

Technische Universität Clausthal

Fakultät für Mathematik, Informatik und Maschinenbau

**Untersuchungen zum Ultraschallschweißen von
hochgefüllten Graphit-Compounds mit Metallen zur
Anwendung in PEM-Brennstoffzellen**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

vorgelegt von

M.Eng. Abed Al Rahman Al Masri

aus Beirut

genehmigt von der

Fakultät für Mathematik, Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
18. Dezember 2015

Vorsitzender der Promotionskommission:

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

Hauptberichterstatter

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling

Mitberichterstatter

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann

Abed Al Rahman Al Masri

Untersuchungen zum Ultraschallschweißen von hochgefüllten Graphit-Compounds mit Metallen zur Anwendung in PEM-Brennstoffzellen

Dissertation 2015

Technische Universität Clausthal

ISBN 978-3-945086-84-1

Vorwort

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren (ISAF) der Technischen Universität Clausthal im Rahmen des vom Land Niedersachsen und dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderten Projektes „Entwicklung einer NT-PEM-Brennstoffzelle mit gedrehter Membran-Plattenebene“.

Mein herzliches Dank gilt besonders meinem Doktorvater, dem Lehrstuhlinhaber und Direktor des Institutes für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren, Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling, für die freundliche Übertragung des hochinteressanten und anspruchsvollen Themas, für die Unterstützung und Betreuung und die Bereitstellung des Arbeitsplatzes.

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann danke ich für seine Mühen und Bereitschaft zur Übernahme des Koreferates und die Beteiligung an der mündlichen Prüfung.

Ich möchte mich besonders bedanken bei Frau Dr. Antonia Schram, Herrn Dr. Rolf Reiter, Dr. Jens Hamje, Dr. Bernd Weidenfeller und Dr. Heiner Grimm für ihre guten Hinweise, Anregungen und die Bereitschaft, Ihre Erfahrung zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeitern der Werkstoffprüfung, der mechanischen und elektrischen Werkstätten am Institut für die wohlwollende Unterstützung und Förderung sowie die stete Diskussionsbereitschaft. Ohne Ihre Mitarbeit und Unterstützung wäre die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Herrn M.Sc. Marvin Hecht danke ich für die sprachliche Korrektur meiner Doktorarbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Thorsten Hickmann von der Eisenhuth GmbH & Co. KG, Herrn Markus Sturmbichler von der Einsinger GmbH und Herrn Robin Mohr von der Hermann Ultraschall GmbH & Co. KG für die konstruktive Zusammenarbeit, die Bereitstellung der Ultraschallschweißanlage und der Versuchswerkstoffe sowie für die Fertigung von Baugruppen während der Projektbearbeitung.

Herr Steffen Johne von der Umex GmbH Dresden danke ich für die Bereitstellung von Statgraphics sowie sein im Rat und Tat beiseite stehen.

Zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie und meinem Freundeskreis für die geschaffenen Möglichkeiten, die geduldige Unterstützung und die Rücksichtnahme während der Erstellung dieser Arbeit.

Kurzfassung

Aufgrund des steigenden Wachstums der weltweiten Nachfrage nach Energiequellen unter Berücksichtigung des beginnenden Klimawandels und der Freisetzung von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre bemüht sich die Welt darum, bei steigendem Warenkonsum den Einsatz von fossilen Energierquellen durch regenerative Quellen zu stärken. Durch zunehmende Forschung wurde Graphit – geprägt durch seine Fähigkeit, mit verschiedenen Werkstoffstrukturen kombinierbar zu sein – ein unveräußerlicher Schlüsselwerkstoff in der Brennstoffzellentechnik. Zwar weisen diese spröden Compounds im Vergleich zu Metallen eine niedrigere elektrische Leitfähigkeit, ein leichteres Gewicht und eine hohe Korrosionsbeständigkeit auf, besitzen aber auch im Vergleich dazu schlechte mechanische und thermische Eigenschaften.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, eine Lösung zur Herstellung einer formschlüssigen Verbindung zwischen Metallen und hochgefüllten Graphit-Compounds darzustellen. Damit wird eine Senkung des Kontaktwiderstandes zwischen Gasverteiler und Stromabnehmer in einer Brennstoffzelle erreichbar, was zur Leistungssteigerung des Stacks und vor allem zu einer Erweiterung des bisher bekannten Anwendungsspektrums des Ultraschallschweißens führt. Eine zweite Untersuchung in diesem Zusammenhang ist das Ultraschallschweißen von gleichen Compounds mit einer Gasdiffusionsschicht. Mit den metallografischen Untersuchungen wird eine kraftschlüssige Verbindung nachgewiesen. Bei allen Zielgrößen dominieren die Schweißzeit und die Vorwärmungstemperatur als wichtigste Faktoren. Die Ergebnisse der mechanisch-technologischen Untersuchungen der mittels Ultraschallfügens hergestellten Verbunde zeigen sich im Vergleich zu den Ergebnissen der konventionellen Verbunde wie Kohlenstoff- und Glasfaserverbundwerkstoffen mit Metallen überlegen.

Die elektrischen Untersuchungen der geschweißten Verbunde haben eine Reduzierung des elektrischen Widerstandes zwischen 15 und 30 % nachgewiesen.

Thermische Untersuchungen zeigten, dass 75 % der hergestellten Verbundproben eine niedrigere Temperaturleitfähigkeit als normale Graphit-Compounds besitzen. Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit zeigten ebenfalls eine Verbesserung der thermischen Eigenschaften des Compounds durch die Verbindung zu Metall.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Zielstellung der Arbeit	3
3. Stand der Forschung	6
3.1. Physikalische Grundlagen des Ultraschallschweißens	6
3.2. Kinematische Grundlagen des Ultraschallschweißens	10
3.3. Verfahrensprinzip	11
3.3.1. Generator	13
3.3.2. Konverter	14
3.3.3. Booster	16
3.3.4. Sonotrode	16
3.3.5. Amboss	18
3.3.6. Schweißpresse	20
3.4. Energieumwandlung	21
3.5. Prozessablauf beim Ultraschall-Kunststoffschweißen	24
3.5.1. Abschmelzen des Energierichtungsgebers (ERG)	25
3.5.2. Ankopplung zwischen oberen und unteren Fügeteil	27
3.5.3. Stationäre Abschmelzphase	28
3.5.4. Haltephase	30
3.6. Stand der Anwendungsgebiete des Ultraschallschweißens	31
3.6.1. Polymer / Polymer-Faserverbund	32
3.6.2. Metall / Metall-Verbund	34
3.6.3. Keramik / Metall - Verbundwerkstoffe	36
3.6.4. Metall / glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe	37
3.6.5. Metall / kohlenfaserverstärkte Verbundwerkstoffe	37
3.7. Einsatz der Vorwärmung beim Ultraschallschweißen	40
4. Versuchsanlage und Versuchsdurchführung	42
4.1. Eingesetzte Ultraschallschweißanlage	42
4.2. Versuchswerkstoffe	45
4.2.1. Graphit-Compound-Werkstoffe	45
4.2.2. Ermittlung der Glasüberübergangstemperaturen der Graphit-Compound- Werkstoffe	48
4.2.3. Elektrische Leitfähigkeitsmessung von Graphit-Compounds	53

4.2.4. Metallische Werkstoffe	54
4.2.5. Probengeometrie.....	57
4.2.6. Sonotrodengeometrie	58
4.3. Statistische Versuchsplanung	65
5. Bewertungsverfahren der hergestellten Verbunde	67
5.1. Scherzugversuch.....	67
5.2. In-Plane elektrische Widerstandsmessung	68
5.3. Thermische Analyse	70
6. Experimentelle Voruntersuchungen.....	71
6.1. Herstellung von Graphit-Compound/Nickel-Verbunden	71
6.2. Ultraschallschweißen von BMA5-Platten mit einer Gasdiffusions-Schicht in NT-PEM-Brennstoffzellen	81
6.3. Ultraschallschweißen von TECACOMP® PP HTE mit Edelstahlnetz.....	84
6.4. Zusammenfassung der Voruntersuchungen	85
7. Graphit-Compound/Metall-Verbund.....	87
7.1. Definition der Schweißparameter und Zielgrößen	87
7.2. Erstellung des Versuchsplans	94
7.3. Vergleich Soll/Ist-Schweißenergie.....	96
7.4. Temperaturverlauf in der Fügezone	97
7.5. Einfluss der Schweißzeit auf den Fügeweg.....	99
7.5.1. Regressionsmodell	101
7.6. Metallografische Untersuchung	102
7.7. Modellbildung für die Scherzugfestigkeit.....	105
7.8. Modellbildung für die Scherzugdehnung	110
7.9. Messung des elektrischen Widerstandes	113
7.10. Modellbildung für den elektrischen Widerstand	119
7.11. Optimierung des Schweißprozesses	124
7.12. Messung der Temperatur-und Wärmeleitfähigkeit	126
8. Beurteilung der Ergebnisse	130
9. Zusammenfassung.....	131
10. Ausblick.....	135
Literaturverzeichnis.....	137
Abbildungsverzeichnis	153
Tabellenverzeichnis.....	158

Nomenklatur

Abkürzungen

BBP	Bipolarplatte
BMA5	SIGRACET® BPP mit PVDF
CF-PEEK	Carbonfaserverstärktes Polyetheretherketon
DSC	Differential Scanning Calorimetry (Dynamische Differenzkalorimetrie)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	U.S. Department of Energy
DOE	Design of Experiments
GDL	Gasdiffusionsschicht
Gew.	Gewicht
ERG	Energierichtungsgeber
FC	Fuel-Cell (Brennstoffzelle)
FG	Freiheitsgrade
IR	Infrarot
MEA	Membran-Elektroden-Einheit
min.	Minimum
max.	Maximum
NiCo2917	Eisen-Nickel-Kobalt-Legierung (Handelsname: KOVAR)
Ni	Nickel
NT-PEM	Niedertemperatur-Polymerelektrolytmembran
PA	Polyamid
PEEK	Polyethereketone
PEM	Polymerelektrolytmembran
PP	Polypropylen
POM	Polyoxymethylen
PPG86	SIGRACET® BPP mit PP
PTFE	Polytetrafluoroethylen (Teflon)
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PWM	Pulsweitenmodulator
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
REM	Rasterelektronenmikroskop
SiC	Siliciumcarbid

Si_3N_4	Siliziumnitrid
T_G	Glasübergangstemperatur
Ti	Titan
US	Ultraschallschweißen
T_V	Vorwärmungstemperatur
X5CrNi1810	Nichtrostender austenitischer Stahl (Werkstoff Nr. 1.4301)
ZrO_2	Zirkoniumdioxid

Lateinische/Deutsche Formelzeichen

A	Amplitude in μm
A_K	Koppelfläche des Schwingsystems in mm^2
a	Beschleunigung in m/s^2
B	Fließkanalbreite in mm
c	spezifische Wärmekapazität in $\text{J/kg}\cdot\text{K}$
c_v	Schallgeschwindigkeit in m/s
c_f	Federkonstante in N/mm
D	Durchlässigkeitsfaktor
D_F	elektrische Flussdichte in C/m^2
d	piezoelektrische Konstante
E	Elastizitätsmodul in kN/mm^2
E_{diss}	Dissipationsenergie in J
E^*	komplexes Schubmodul
E_F	elektrische Feldstärke in V/m
E'	Speichermodul
E''	Verlustmodul
F	Anpresskraft in N
F_R	Reibungskraft in N
f	Frequenz in Hz
f_p	Resonanzfrequenz im Lastfall in Hz
f_0	Resonanzfrequenz im Leerlauf in Hz
G	Tastverhältnis
G_{ein}	Einschaltdauer in s
G_{aus}	Ausschaltdauer in s
h	Schmelzschichtdicke in mm
VI	

H	Fließkanalhöhe (Höhe des ERGs) in mm
H_0	Schmelzeschichtdicke zu Beginn der Haltephase in mm
I	Strom in A
J	Schallintensität in W/m^2
K	Kopplungsfaktor
K'	Fließgesetzkoeffizient
k	Dämpfungskoeffizient
L	Fließkanallänge in mm
I_{eff}	Effektive Stromstärke in A
m_s	Masse der Sonotrode in kg
n	Fließexponent
P	Leistung in W
p_0	Schallwechseldruck an einer beliebigen Stelle x_0 in Pa
p_x	Schallwechseldruck bei der Wellenausbreitung im Abstand von x_0 in Pa
p_k	kritischer Druck für Auftreten von Grenzflächenreibung in Pa
p	lokal wirksamer Fügedruck in Pa
Q	Schallfluss in m^3/s^1
R	elektrischer Widerstand in Ω
R^*	Reflexionsfaktor
S	Fügefläche in mm^2
s	Probendicke in mm
T	Temperatur in $^{\circ}\text{C}$
t	Zeit in s
$t_{0,5}$	Zeit bis zum Erreichen von 50 % des maximalen Temperaturanstiegs in s
t_h	Haltezeit in s
t_s	Schweißzeit in s
U	Spannung in V
$U_{\text{eff.}}$	effektive Spannung in V
U_m	Mittelspannung in V
U_{aus}	Ausschaltspannung in V
U_{ein}	Einschaltspannung in V
V	Verstärkungsfaktor
v	Schallschnelle (Teilchengeschwindigkeit) in m/s
W_1, W_2	Schallwellenwiderstände beiderseits der reflektierenden Welle in $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$

X	Länge in mm
x, y, z	Koordinaten
Z_a	akustische Impedanz in $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$
Z_o	Schallkennimpedanz in $\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$

Griechische Formelzeichen

σ	mechanische Spannung (Zug, Druck) in N/mm^2
ε	mechanische Deformation (Dehnung, Stauchung) in N/mm^2
$\hat{\varepsilon}$	maximale Dehnung in N/mm^2
ω	Kreisfrequenz in rad/s
ρ	Dichte in g/cm^3
φ	Phasenverschiebung in $^\circ$
φ_K	Phasenwinkel der mitgekoppelten Spannung in $^\circ$
μ	Reibungskoeffizient
π	Kreiszahl
η	Dämpfungsfaktor
ζ	Energie in J
τ	Schubspannung in N/mm^2
γ	Schergeschwindigkeit in s^{-1}
θ	Dehnungsgeschwindigkeit in s^{-1}
Δ	Temperaturleitfähigkeit in mm^2/s
ΔA	Differenz der Schwingungsamplitude in μm
λ	Wellenlänge in nm
κ	thermische Leitfähigkeit in $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$
δ	Verlustwinkel

1. Einleitung

Mit dem stetigen Anstieg der weltweiten Nachfrage nach Energiequellen unter Berücksichtigung des seit vielen Jahren diskutierten Klimawandels und der angestrebten geringen Freisetzung von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre bieten immer mehr interessante, umweltfreundliche Technologien neue Möglichkeiten zur alternativen Energieerzeugung. Die Welt bemüht sich darum, bei immer weiter steigendem Warenkonsum den Einsatz von verknüpften fossilen Energierquellen durch regenerative Quellen zu stärken. Aus diesem Grund wird die Forschung nach effizienten Energiewandlern immer wichtiger. Vor allem in der Brennstoffzellentechnik ist die Suche nach neuen Werkstoffen beziehungsweise die Erweiterung des Wissenstandes ein Ziel vieler Forschungsanstalten und Unternehmen. Es gelingt nicht immer, etwas Neues zu entdecken, aber jeder Versuch, die Effektivität vorhandener Ressourcen zu ersteinern, ist viel wert.

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler, der aufgrund seiner einfachen Funktionsweise und seines hohen Wirkungsgrades ohne jegliche CO₂-Emission schon einige Jahre Forschungsthema hoher Priorität ist. Teilweise sind bereits seit Jahren Brennstoffzellen auf dem Markt erhältlich und für kommerzielle Anwendungen im Einsatz. Das ändert aber nicht die Tatsache, dass in Bereich der Brennstoffzellentechnologie noch weiter intensiv geforscht werden muss.

Die Stromerzeugung in der Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEM-FC) wird durch die direkte Umwandlung kontinuierlich zugeführter Brenngase in chemische Reaktionsenergie angestoßen. Bisher wurden diverse Brennstoffzellentypen für verschiedene Betriebstemperaturen entwickelt. Heute stehen Brennstoffzellen als Energiequelle für diverse Anwendungen unter anderem in der Automobilindustrie sowie in zivilen und militärischen Telekommunikationsanlagen zur Verfügung.

Durch zunehmende Forschung wurde Graphit - geprägt durch seine Fähigkeit, mit verschiedenen Werkstoffstrukturen kombinierbar zu sein - ein unveräußerlicher Schlüsselwerkstoff in der Industrie. Durch dessen Einsatz als Füllstoff im Kunststoffbereich konnten hochgefüllte-Graphit Polymere umfangreichen Anforderungen auf Hoch- und Niedertemperaturebenen gerecht werden. Die Zusammenstellung außergewöhnlicher Eigenschaften, vor allem die gute thermisch-chemische Beständigkeit und die hohe elektrische sowie die Wärmeleitfähigkeit von Graphit machte es schon früh zum erfolgversprechenden Leistungsträger im Bereich der Brennstoffzellentechnik. Heutzutage können Graphit-Compounds mit verschiedenen Herstellungsverfahren wie zum Beispiel

Heißpressen oder Spritzgießen erzeugt werden. Diese Tatsache erweitert die zuvor eingeschränkten Zerspanungsmöglichkeiten und senkt die aufwändigen Verarbeitungskosten von Graphit.

Der Begriff Compound stammt ursprünglich aus der Kunststofftechnik. Ein Compound ist ein Kunststoff, dessen Materialeigenschaften durch Einarbeitung von Füllstoffen geändert werden [Kre08]. Diese Graphit-Compounds bestehen aus einem hoch-graphithaltigen Anteil (80 - 85 Gew.-%) und thermoplastischen Bindern wie Polypropylen, Polyvinylidenfluorid oder Polystyrol. Vor allem als Gasverteilerplatte in der Brennstoffzelle liefern sie die Reaktionsgase an die Membran-Elektroden-Einheiten (MEA). Sie trennen die Gasebene zwischen Stack-Einzelsellen und stellen einen elektrisch leitfähigen Raum zwischen Anode und Kathode her. Gleichzeitig weisen sie keine Bildung von Metallionen und somit keine Schädigung der Membran-Elektroden-Einheit auf [Kan12].

Zwar weisen diese spröden Compounds aufgrund des beinhalteten Polymer-Binders im Vergleich zu Metallen eine niedrige elektrische Leitfähigkeit, geringeres Gewicht und hohe Korrosionsbeständigkeit auf, besitzen aber auch im Vergleich dazu schlechte mechanische und thermische Eigenschaften. Außerdem macht der hohe Graphitanteil die fertigungstechnische Handhabung zur Herausforderung und führt dazu, dass diese Compounds teurer sind als Metalle.

Die Verwendeten Graphit-Compounds sind PPG86 und BMA5 mit Graphitanteilen von jeweils 86 und 85 Gew.-%. Diese Compounds werden zurzeit nur bei der Firma-Eisenhuth GmbH & Co. KG in Osterode als Basismaterial für Bipolarplatten hergestellt. Bereits heute ist Eisenhuth eines von zwei führenden Unternehmen in Europa im Bereich der Lieferung von graphitischen Bipolarplatten für unterschiedliche Anwendungen. Die Kunden der Firma Eisenhuth finden sich überwiegend in den Anwendungen HT-PEM, NT-PEM und Redox-Flow-Batterien wieder.

In diesem Zusammenhang besteht das Bedürfnis, die elektrischen und thermischen Eigenschaften dieser Graphit-Compounds und somit die Leistungsfähigkeit von Brennstoffzellen zu verbessern. Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit grundlegende Untersuchungen zu Verarbeitung solcher Compounds, insbesondere zur Verbundherstellung mit dem wirtschaftlichen Fügeverfahren Ultraschallschweißen durchgeführt. Bis dato ist das Ultraschallschweißen noch nicht mit hochgefüllten Graphit-Compounds durchgeführt worden. Somit wird das Einsatzspektrum dieser Fügemethode um einen Schritt erweitert.

2. Zielstellung der Arbeit

Das Ultraschallschweißen hat sich seit mehreren Jahren als kostengünstiges und umweltfreundliches Fügeverfahren etabliert. Es hat sich in der Serienfertigung aufgrund seiner kurzen Prozesszeiten und als bewährtes Fügeverfahren für thermoplastische und metallische Werkstoffe erwiesen. Aufgrund des anspruchsvollen Einsatzbereiches von hochgefüllten Graphit-Compounds als Gasverteilerplatte in der Brennstoffzelle und steigenden elektrischen und thermischen Erwartungen, wurden in dieser Arbeit solche Werkstoffe als Basispunkt zur Erhöhung der Brennstoffzellen-Effizienz als Ziel genommen. Durch chemische Oxidation zwischen den beiden Prozessgasen (bei PEM-FC Wasserstoff und Sauerstoff) und der daraus entstehenden indirekten Elektronenwanderung zwischen den Elektroden über einen Elektrolyt, der nur Protonenaustausch zulässt, kommt es zur Stromerzeugung. Dieser Strom wird durch ein Stromkollektor - der direkt an die Gasverteilerplatte angeschlossen ist - an den Verbraucher weitergeleitet.

Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass der durch chemische Reaktionen in der Brennstoffzelle erzeugte Strom, durch angedrückte metallische Stromabnehmer an der graphithaltigen Platte abgenommen wird (Abbildung 2.1). Diese Maßnahme weist trotz jahrelangen Erfolgs einen hohen elektrischen Widerstand zwischen den beiden Komponenten auf und bewirkt somit eine Leistungsherabsetzung der Brennstoffzelle.

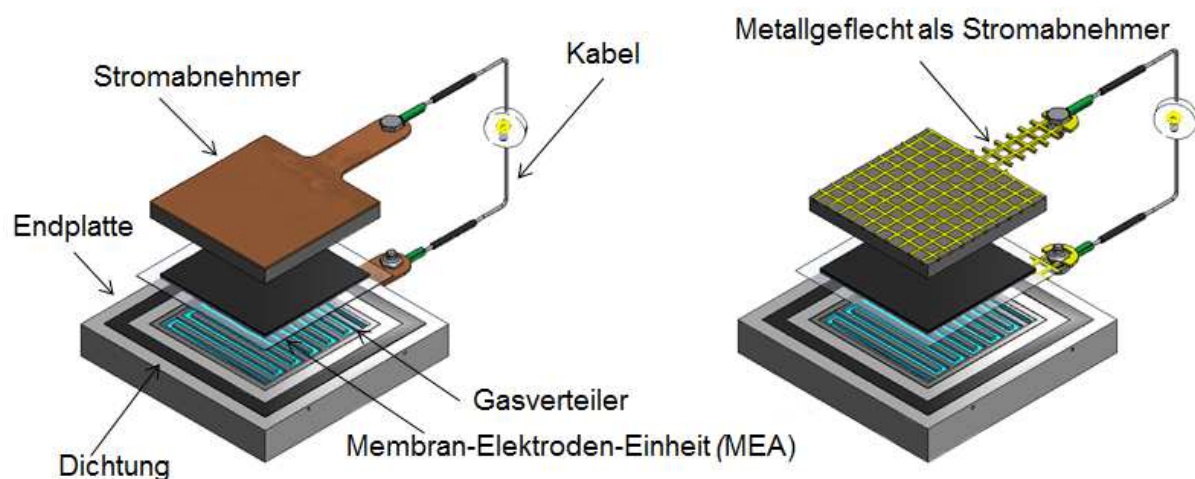


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Untersuchungsziels

Das Hauptziel dieser Arbeit war es, eine Lösung zur Herstellung einer formschlüssigen Verbindung darzustellen. Diese findet zwischen einem metallischen Fügepartner (als Stromabnehmer), in diesem Fall einem Nickel- und Edelstahlnetz, und hochgefüllten Graphit-Compound-Platten statt, die üblicherweise bei Brennstoffzellen im Niedertemperaturbereich

eingesetzt werden (Abbildung 2.1). Durch Herstellung einer solchen Verbindung kann eine Reihe von Vorteilen erreicht werden. Erstens wird eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Graphit-Compounds ohne Erhöhung des Graphitanteils und somit einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit unter anderem bei der spanenden Herstellung der Kanalstruktur ermöglicht. Das Metall wurde direkt in die Gasverteilerplatte eingetaucht und zum Stromabnehmer in einer Baugruppe bei der späteren Montage angewendet. Material- und Gewichtsersparnis durch die gitterförmige Gestaltung können damit erzielt werden.

Zweitens ist eine kostengünstige Anbringung des metallischen Werkstoffs in das Compound nach Herstellung per Spritzgießen oder Heißpressen möglich und somit bleiben klassische wie Heißpressen oder Spritzgießen Fertigungsverfahren unberührt.

Drittens ist eine Senkung des Kontaktwiderstandes zwischen Gasverteiler und Stromabnehmer erreichbar, was ebenfalls die Leistung des Stacks erhöht und vor allem zu einer Erweiterung des bisher bekannten Anwendungsspektrums des Ultraschallschweißens führt.

Bisher wurden keine Untersuchungen zum formschlüssigen Fügen von mit Graphit hochgefüllten Materialien mittels Ultraschallschweißen durchgeführt. Dies wurde grundlegend und analytisch untersucht. Anhand der vielen Potenziale, die das Ultraschallschweißverfahren aufzeigt - vor allem die geringe Kosten und eine genaue Prozesskontrolle - wurde das Verfahren als erfolgsversprechend angesehen und eingesetzt. Da aber Graphit als Füller dem Werkstoff eine sehr hohe Sprödigkeit verleiht, war die größte Herausforderung, ein Kompromiss zwischen Materialeigenschaften und Grenzen des Ultraschallschweißverfahrens zu finden. Das Einschalten von 20 kHz-longitudinalen Wellen bei gleichzeitiger Druckanwendung führt bei graphithaltigen Platten mit ihren niedrigen Druckfestigkeiten zur Schädigung. Aufgrund dessen wurde die chemische Zusammensetzung des Graphit-Compounds intensiver betrachtet und als Leitfaden zum Erfolg herangezogen. Die Vorgehensweise bei Betrachtung des Problems wurde in Abbildung 2.2 dargestellt.

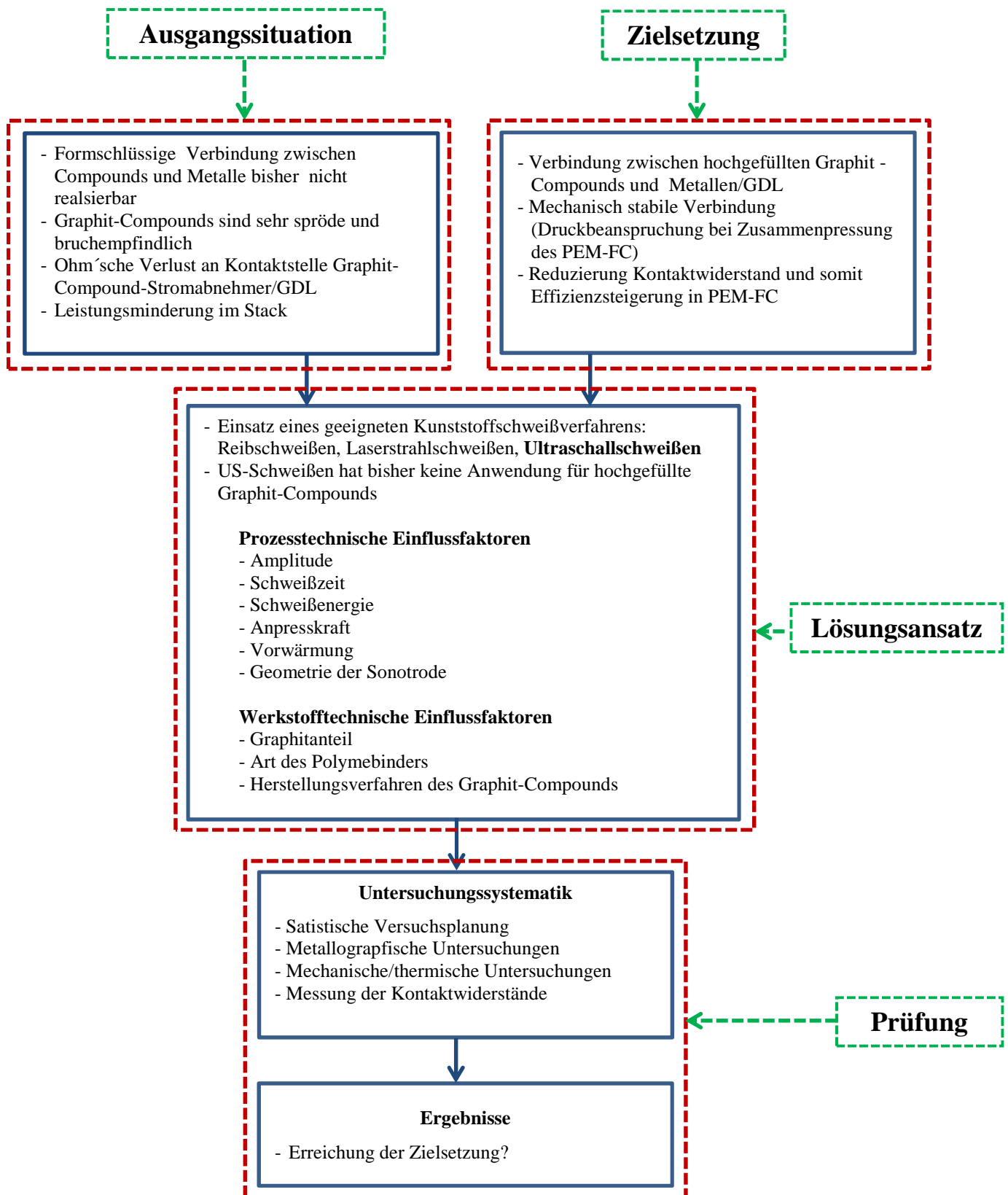


Abbildung 2.2: Systematische Vorgehensweise zur Betrachtung der Problemstellung

3. Stand der Forschung

3.1. Physikalische Grundlagen des Ultraschallschweißens

Die Ultraschallschwingungen sind mechanische Schwingungen mit einem Frequenzbereich, der oberhalb vom Hörbarkeitsvermögen des menschlichen Ohrs liegt [Wod04]. Laut der Definition des ultravioletten Lichtes ist ein Ultraschall derjenige Bereich einer akustischen Welle, der aufgrund dessen Frequenzen der menschlichen Wahrnehmung nicht zugänglich ist. Das Hörvermögen des Menschen kann individuell verschiedene Frequenzgrenze besitzen. Dies ist vom Gesundheitszustand und Lebensalter abhängig. Darum kann das Ultraschallspektrum von dem Bereich des hörbaren Schalls nicht abgegrenzt werden. Üblicherweise wird bei einer Schallfrequenz oberhalb von 20 kHz von einem Ultraschall gesprochen [Kut88].

Die Geschichte der Ultraschallentwicklung war naturgemäß mit der Entwicklung der allgemeinen Akustik verbunden. Wenige Verfahren zur Erzeugung von Ultraschall waren vor Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt. Am bekanntesten war die Methode mit rotierenden Zahnrädern, mit denen dünne Platten zu Schwingungen angestoßen wurden (Savart, 1830) sowie entsprechend dimensionierte Pfeifen (Galton, 1876). Im Laufe des 19. Jahrhunderts wurden revolutionäre Entdeckungen veröffentlicht, die die Ultraschalltechnik massiv nach vorne brachten. Hierzu zählten die Entdeckung und erste Untersuchung zur Magnetostriktion zur Herstellung von Ultraschall durch J. P. Joule (1847) und des piezoelektrischen Effekts an natürlichen Kristallen sowie den damals bekannten piezoelektrischen Stoffen wie Seignettesalz und Turmalin durch die Brüder J. und P. Curie (1880) [Kut88, Bec03].

Der piezoelektrische Effekt ist durch eine Asymmetrie im Kristallaufbau gekennzeichnet. Dies trägt zur Verschiebung der positiv geladenen Ionen gegenüber gleichartigen negativ geladenen, bei einer elastischen Beanspruchung, beziehungsweise von ihr bewirkten Deformation des Kristalls, bei. So entsteht an jeder Kristallzelle ein elektrisches Dipolmoment (Abbildung 3.1).

Die wichtigsten Piezomaterialien sind ferroelektrisch. Sie weisen oberhalb einer bestimmten Temperatur, der Curie-Temperatur, eine hohe Symmetrie auf. Unterhalb dieser Temperatur ändert das Kristallgitter seine Geometrie so rasch, dass sich die positiv und negativ geladenen Ionen gegeneinander lagern. Die wichtigsten Vertreter dieser Werkstoffe sind Bariumtitanat (BaTiO_2), Bleizirkonatitanat ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$) mit dem Handelsname PZT sowie Bleimetaniobat (PbNb_2O_6) und Lithiumniobat (LiNbO_3) [Kut88, Bal09].

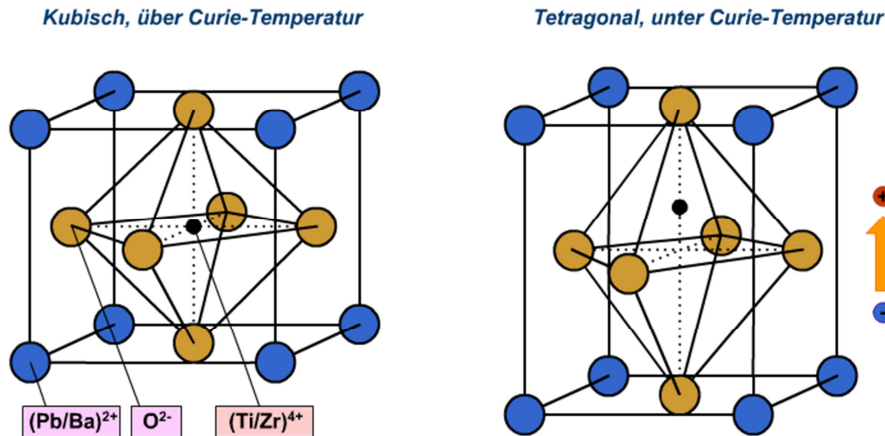


Abbildung 3.1: Piezoelektrische Elementarzellen von PZT-Keramik mit kubischer und tetragonaler Kristallstruktur [Bal09, Aca14]

Im Laufe der industriellen Entwicklung konnten die piezoelektrischen Keramiken preiswert und in verschiedenen Formen künstlich erzeugt werden. Diese werden aus kristallinem Pulver gewonnen und durch die Anwendung der Porzellanherstellungsmethoden werden harte, keramische Formkörper hoher Festigkeit erreicht. Derart erzeugte Platten sind aber noch nicht piezoelektrisch, weil es in dem polykristallinen Körper weder Vorzugsrichtung noch eine gemeinsame elektrische Achse gibt.

Bei Erwärmung solcher Platte oberhalb von 1000 °C wird sie zunächst gebrannt. Nach dem Schleifen auf Endmaß wird sie wieder auf 100 °C erwärmt und einem elektrischen Feld von etwa 10 kV/cm ausgesetzt. Die Polarisation entsteht in der Platte durch eine geordnete Verteilung eines elektrischen Dipol in Richtung des angelegten elektrischen Feldes. Bei konstantem elektrischen Feld und Abkühlung der Platte auf Raumtemperatur bleibt die Polarisation erhalten. So erhält die Platte ihre piezoelektrischen Eigenschaften [Leh73].

Für den direkten Piezoeffekt gilt nach [Mil87, Wod04]:

$$D_f = d \cdot \sigma \left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.1)$$

Bei der umgekehrten piezoelektrischen Effekt werden die Quarzkristalle in einem zweiphasigen elektrischen Wechselfeld gleichzeitig gedrückt und gezogen. Während diesen Prozessen liegen sowohl das elektrische Wechselfeld und die polare Achse des Kristalls in der gleichen Richtung. Dabei gilt:

$$\varepsilon = d \cdot E_F \quad (2.2)$$

Die piezoelektrische Konstante d ist somit für beide Effekte numerisch gleich.

Der Schall besteht aus mechanischen Schwingungen, die sich in elastischen Medien ausbreiten. Die Existenz der Schallwellen ist von räumlichen und zeitlichen Änderungen der

Dichte, des Drucks und der Temperatur abhängig. Der Abstand λ zwischen zwei gleichartigen, benachbarten Schwingungen ist gleich groß, solange die Frequenz konstant ist.

Dabei gilt:

$$c_v = f \cdot \lambda \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.3)$$

Der Zusammenhang zwischen der Schallschnelle (Teilchengeschwindigkeit) v und der Amplitude A ist wie folgt:

$$v = \frac{dA}{dt} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.4)$$

Die maximale Schallschnelle lautet:

$$v_{max} = \omega \cdot A \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.5)$$

$$\text{Wobei gilt: } \omega = 2 \cdot \pi \cdot f \left[\frac{1}{s} \right] \quad (2.6)$$

Der Schallausschlag bei einer sinusförmigen Auslenkung der Mediumteilchen beträgt:

$$A = \frac{v}{\omega} [\mu m] \quad (2.7)$$

Bei Differenzierung der Gleichung (2.4) ergibt sich die Beschleunigung a :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 \cdot A}{dt^2} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (2.8)$$

Bei einer sinusförmigen Bewegung beträgt die Beschleunigung a :

$$a = \omega \cdot v = \omega^2 \cdot A \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (2.9)$$

Das Verhältnis von Schalldruck p zu Schallschnelle v ist bei einer ebenen Schallwelle ist zu jedem Zeitpunkt und an jeder Stelle eines Raumes konstant. Diese Verhältnissgröße wird als Schall-Kenn-Impedanz Z_o bezeichnet:

$$Z_o = \frac{p}{v} = \rho \cdot c_v \left[\frac{Kg}{m^2 \cdot s} \right] \quad (2.10)$$

$$\text{Dabei gilt für den Schalldruck: } p = \rho \cdot v = \omega \cdot \rho \cdot c_v \cdot A \left[\frac{Kg}{m \cdot s^2} \right] \quad (2.11)$$

Die akustische Impedanz gilt als Z_a als Quotient p aus Schalldruck und Schallfluss q :

$$Z_a = \frac{p}{q} \left[\frac{Pa \cdot s}{m^3} \right] \quad (2.12)$$

Die Schallleistung P ist die Summe aller Energien in einer Sekunde, die eine Schallquelle in alle Richtungen verbreitet:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A^2 \cdot \omega^2 \cdot c_v \cdot A_K \quad [W] \quad (2.13)$$

Die Energiedichte e^* ist die Ultraschallenergie je Volumeneinheit.

$$e^* = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \left[\frac{kg}{m \cdot s^2} \right] \quad (2.14)$$

Mit der Schallintensität J kann man die Schallenergie beschreiben. Für eine ebene Welle ergibt sich für die Schallintensität J mit den Effektivwerten des Schallwechseldrucks p und der Schallschnelle v :

$$J = \frac{1}{2} Z_o \cdot \omega^2 \cdot A^2 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.15)$$

Der Schallwellenwiderstand ändert sich schlagartig beim Aufprall der Ultraschallwelle auf einer Grenzfläche:

$$R = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \right) \leq 1 \quad (2.16)$$

$$\text{Wobei gilt: } W = \rho \cdot c_v \left[\frac{kg}{m \cdot s^2} \right] \quad (2.17)$$

Der Durchlässigkeitsfaktor ergibt sich somit:

$$D = 1 - R^* \quad (2.18)$$

Die Dämpfung der Ultraschallschwingungen durch innere Reibung

$$p_x = p_0 \cdot e^{-k \cdot x} \left[\frac{N}{m \cdot s^2} \right] \quad (2.19)$$

Beim Ultraschallschweißen werden die Ultraschallwellen durch die Sonotrode als mechanische Schwingungen auf die zu verschweißenden Teile übertragen. Diese Wellen kommen in verschiedenen Arten vor.

Die Längswellen dehnen sich in allen Materialien aus. Sie breiten sich parallel zu der Achse der Schwingungsauslöser aus. Die zugehörigen Schwingungszustände sind sowohl dimensional als auch longitudinal von der Wellenlänge abhängig. Sobald sich ein schwingungsfähiges System in Betrieb setzt, werden die Längswellen vollständig zum immateriellen Energieträger.

Die Transversalwellen werden hingegen nur in festen Körpern ausgestoßen und weitergeleitet. Solche Wellen sind beim Ultraschallschweißen zu unterdrücken, da die Grenzflächenschicht der Sonotrode Schwingungen unterworfen ist und somit keine Energie auf die Berührungsflächen der Energieverbraucher übertragen wird. Die Zirkularwellen eines Körpers werden durch eine Längserregung erzeugt. Solche Wellen liegen im Ultraschallbereich, wenn ein Ungleichgewicht beim Massenverhältnis existiert. Beim Ultraschallschweißen

verursachen solche Wellen beachtliche Probleme. Sie können die Piezoelemente beschädigen, insbesondere während der Übertragung der Ultraschallwellen vom Booster zur Sonotrode. Es entstehen dadurch reziproke Schwingungen zwischen Booster und piezoelektrischem Keramikinstrument. Darum muss bei der Sonotrodenauslegung die Entstehung zirkularer Wellen und deren Minimierung in Betracht gezogen werden [Dup14].

3.2. Kinematische Grundlagen des Ultraschallschweißens

Das Ultraschallschweißen für metallische Werkstoffe wurde 1950 in den USA bei systematischer Erforschung des Widerstandspunktschweißprozesses zur Senkung des relativ hohen Übergangswiderstandes von Aluminiumlegierungen entwickelt. Durch das neue Verfahren war es damals möglich, den Kontaktwiderstand an der Fügefläche der beiden Schweißpartner ohne komplizierte vorbereitende Maßnahmen zu senken. Bei den Untersuchungen wurde zufällig festgestellt, dass sich nach Abstellen des Schweißstroms und der Ultraschallenergie über die Punktschweißelektroden eine Schweißverbindung entwickelt. Aufgrund dieser Entdeckung begannen zahlreiche experimentelle Entwicklungen von Generatoren und Boostern. Die erste industrielle Anwendung vom Ultraschallschweißen fand in den Jahren 1954 bis 1956 statt und war damals als der wichtigste Fortschritt dieser Jahre im Bereich der Verbindungstechnik. Die Erteilung der ersten Patente über das Erwärmen von thermoplastischen Kunststoffen mittels Ultraschallverfahrens erfolgte in den Jahren 1951 und 1953. Ein Jahrzehnt später wurde das Ultraschallschweißverfahren für Kunststoffe in der Serienfertigung begonnen. In unserer Zeit zählt das Verfahren zu den herkömmlichen Fügeverfahren für thermoplastische Serienteile [Wod04].

Das Ultraschallschweißen wird in zwei Verfahren unterteilt, die Kunststoff- und die Metallultraschallschweißverfahren [Bal09]. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Prozessen besteht in der Schwingungsrichtung der Sonotrode (Abbildung 3.2). Das Kunststoffultraschallschweißen ist durch longitudinale Energiezuführung gekennzeichnet, das heißt, dass die Schweißkraft und die Schwingungen die gleiche Richtung haben [Rot04]. Beim Metallultraschallschweißen erfolgt die Schwingung transversal und die Druckkraft der Sonotrode verläuft parallel zum Schweißpartner. Beim Metallultraschallschweißen wird die stoffschlüssige Verbindung im festen Zustand der zu fügenden Schweißpartnern geschlossen. Da diese Verbindung ohne Aufschmelzen geschieht, vollzieht sich das Ultraschallschweißen mit den gleichen Elementarvorgängen und physikalischen Grundlagen ähnlicher Schweißprozesse wie zum Beispiel des Reib- und Diffusionsschweißens [Wod04]. Beim

Kunststoffultraschallschweißen hingegen erzeugen die durch Longitudinalwellen hervorgerufenen Ultraschallschwingungen, die durch eine Sonotrode auf der gemeinsamen Grenzfläche der zu schweißenden Teile übertragen werden, intermolekulare sowie Grenzreibungen. Der Kunststoff beginnt an der Fügezone zu erweichen und sobald der Dämpfungsfaktor zunimmt, beschleunigt sich die Reaktion, wodurch ein größerer Anteil der Schwingungsenergie in Wärme umgesetzt wird. Damit steigt die Temperatur der Kunststoffteile, bis ihr Schmelzpunkt erreicht wird. Die Verschweißung tritt infolge dieser Wärme ein. Dadurch kommt es zu Mischungen und zur Umschließung der Molekülketten der beiden Schweißpartner [Bor04]. Nachdem die Schwingungen gestoppt werden, wird der Druck beibehalten, bis eine feste, molekulare Bindung erzeugt wird und die Verbindung ausreichend abgekühlt ist [Rot04, Dup14].

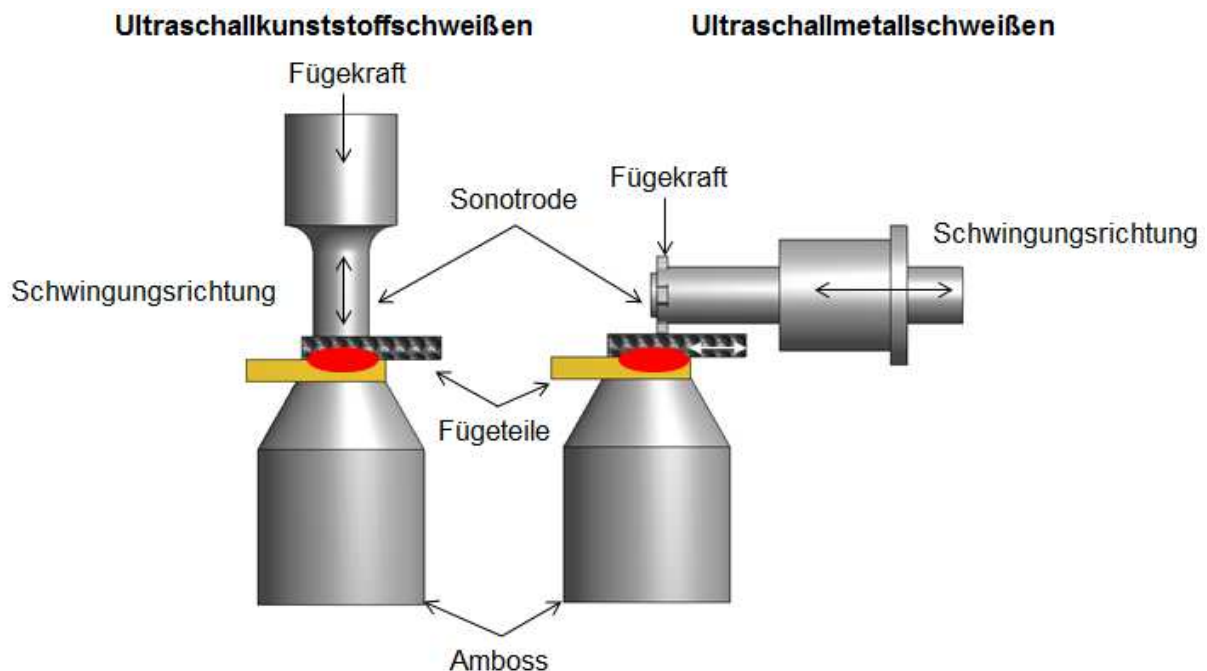


Abbildung 3.2: Verfahrensprinzip beim Ultraschallkunststoff- und Metallschweißen

3.3. Verfahrensprinzip

Beim Ultraschallschweißen handelt es sich um ein stoffschlüssiges Fügeverfahren, welches laut dem Deutschen Institut für Normung (DIN) den Pressschweißverfahren zuzuordnen ist [DIN 1910-3].

Das Ultraschallschweißverfahren ist mit den Pressschweißprozessen Kaltpress- und Reibschweißen vergleichbar. Beim Reibschweißen existiert eine Relativbewegung zweier Schweißpartner, üblicherweise eines rotierenden und eines feststehenden Teils. Durch diese

Bewegung entsteht Reibung und somit wird an der Schweißstelle Wärme hervorgerufen. In wenigen Fällen ist diese Relativbewegung nicht rotatorisch, sondern linear [Fah13].

Die Reibkraft ist proportional zum Fügedruck, Querschnittfläche und Reibungskoeffizient [Fri14]:

$$F_R = p \cdot S \cdot \mu \quad (3.1)$$

Die Relativbewegung kann als Sinusschwingung parallel zu x-Achse definiert werden [Fri14]:

$$x(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (3.2)$$

Beim Kaltpressschweißen werden die beiden Schweißpartner durch zu hohe Druckkraft bei Raumtemperatur in den plastischen Verformungszustand angesiedelt und verbunden. Der ausgeübte Druck muss über der niedrigsten Streckgrenze der beiden zu fügenden Bauteile liegen [Fah13].

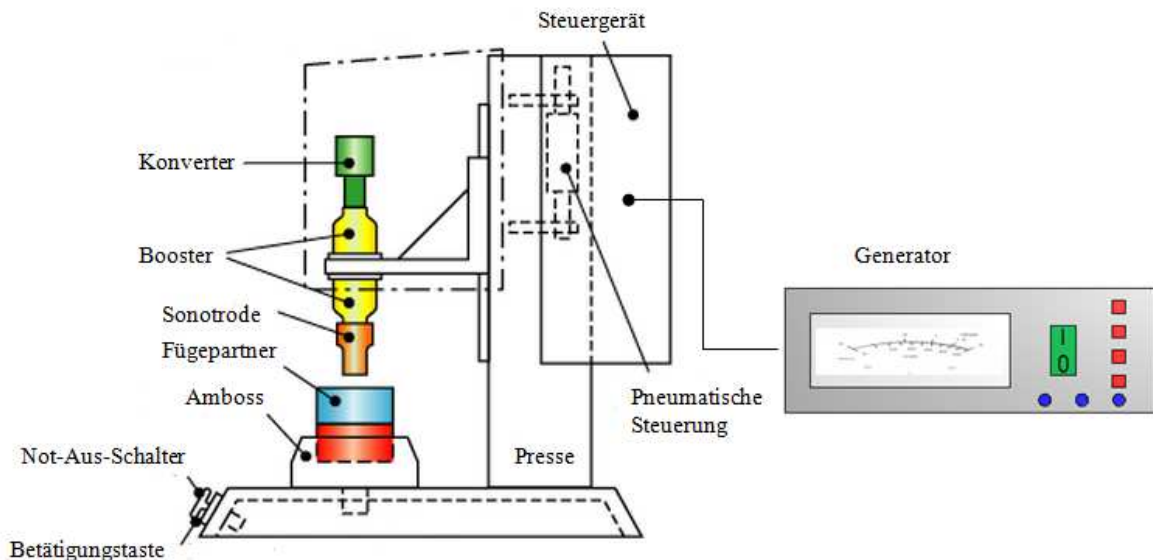


Abbildung 3.3: Funktionsweise des Ultraschallschweißverfahrens [Twi15]

Die Ultraschallschweißgeräte (Abbildung 3.3) besitzen kompliziertere Komponenten im Vergleich zu anderen Schweißverfahren wie zum Beispiel beim Reibschweißen oder Heizelementschweißen.

Heutzutage besteht ein Ultraschallsystem aus einem elektrischen Hochfrequenzgenerator, einem Leistungswandler (piezoelektrischer Konverter), der elektrische Wechselspannung in mechanische Schwingungen umsetzt, einer Zeitsteuerung, einer pneumatischen Presse, dem Booster (Transformationsstück), der Sonotorode (Schweißwerkzeug) und einem Amboss (Haltevorrichtung) [Wod04, Tou08].

3.3.1. Generator

Grundsätzlich wandelt der Generator die niederfrequente Energie des Wechsel-Spannungsnetzes in hochfrequente elektrische Energie, die er an den Wandler in Form elektrische Schwingungen mit einem Nennleistungsbereich von 100 Watt bis mehreren Kilowatt abgibt. Beim Kunststoff-Ultraschallschweißen liegen die Ausgangsfrequenzbereich zwischen 20 und 50 kHz. Ein Ultraschallgenerator besteht in wesentlichen aus folgenden Baugruppen [NN98; Kuh06]:

- Leistungsmodul: Erzeugung von hochfrequenten Schwingungen
- Prozessormodul: Realisierung von Regel-und Steuerabläufen
- Programmiermodul: Kopplung des Leistungsmodul mit externem Anschluss

Bei modernen Ultraschallschweißmaschinen wird zuerst der Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt (Abbildung 3.4). Die Einschaltung des Gleichstromes wird von einem Resonanz-Frequenz-Regelkreis überwacht. Dieser gewährleistet, dass Einflüsse wie Spannungsschwankungen oder Leistungsabfälle die an den Konverter abgegebene Amplitude nicht abnimmt. [Gre03].

$$\varphi_K = 0^\circ \quad (3.3)$$

$$K.V \geq 1 \quad (3.4)$$

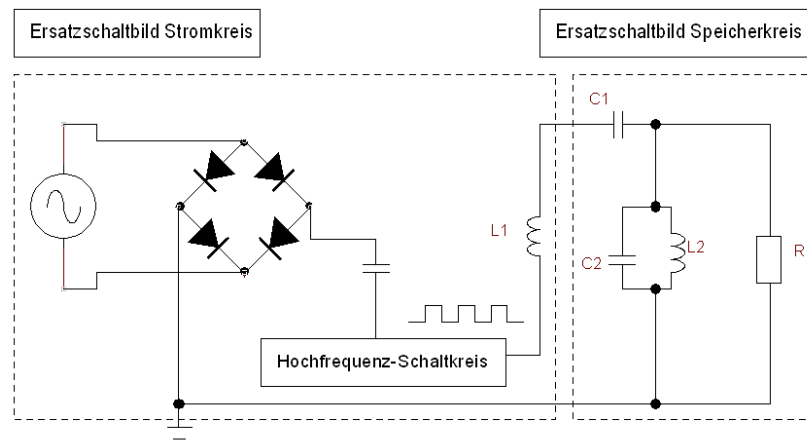


Abbildung 3.4: Ersatzschaltbild des Stromkreises bei einer Ultraschallschweißmaschine nach[Gre03]

Die Erzeugung von ungedämpften, elektrischen Schwingungen erfolgt durch den Einsatz von Oszillatoren. Diese Oszillatoren bestehen aus einer Mitkopplung, einem Verstärker und einem frequenzbestimmendem Glied. Die Mitkopplung spielt eine entscheidende Rolle beim Loslegen der Selbsterregung. Sie integriert einen Teil der Ausgangsspannung zum Generatoreingang. Die Resonanzeinheit (Generator, Konverter und Sonotrode) wird durch

das frequenzbestimmende Glied vertreten [Rit86]. Für die hervorgehende Selbsterregung muss noch der Faktor der Ringverstärkung gleich eins sein [Kuh06].

Die Eigenfrequenz der Resonanzeinheit muss auf die Frequenz der zu erzeugenden Ultraschallschwingung abgestimmt werden [Wod04]. Diese Resonanzeinheit kommt nur zum Schwingen, wenn sie mit einer Frequenz angeregt wird, die mit ihrer Eigenfrequenz übereinstimmt. Damit die Resonanzeinheit ihre angeregte Schwingungen beibehält und keine Ausfälle entstehen, wird kontinuierlich Energie durch den Verstärker zugeführt [Kuh06]. Die Leerlaufleistung des Generators entsteht durch elektrische Verluste im Systems und die mechanischen Verluste der Resonanzeinheit [Ffh01].

Die mechanische Resonanzfrequenz der Booster und Sonotrode bestimmt die Arbeitsfrequenz des Generators. Der optimale Umwandlung der elektrischen Schwingungen in mechanische im Booster, setzt eine Gleichmäßigkeit zwischen Generatorfrequenz und Resonanzfrequenz voraus [Her90].

Die modernen Generatoren sind volltransistorisiert [Dup14] und besitzen ein Abstimmautomatik, die die Resonanzstellenverschiebung der Ultraschallschweißanlage beachtet und über einen Regelkreis die Generatorfrequenz in Abhängigkeit dieser Verschiebung reguliert. Diese Resonanzverschiebung entstehen üblicherweise durch angekoppelten Massen, Bewegungsmechanismus und Dämpfungen an dem gesamten System [Böh92]. Neben Abwandlung der Frequenz an dem Booster, haben Generatoren heutzutage direkte Intervention in die Schwingungsentwicklung. Sie sind mit digitalen Techniken ausgestattet, die die Angleichung der Amplitudenanstiegfunktion bis zum Erreichen der Nennamplitude ermöglichen. Diese Maßnahmen tragen zu Beginn des Schweißprozesses zum Ausweich von entstehenden Überspringern und Leistungsspitzen bei, die die Schweißqualität gegebenenfalls negativ beeinflussen [Bal09].

3.3.2. Konverter

Der Konverter bzw. Wandler wandelt mittels des umgekehrten piezoelektrischen Effekts die übertragene elektrische Energie vom Generator in hochfrequente mechanische Schwingungen derselben Frequenz um. Wenn eine Wechselspannung an den entgegengesetzten Seiten der piezoelektrischen Keramikelemente angelegt ist, dehnen und ziehen sich diese zusammen wie die elektrische Polarität vom positiven zum negativen Pol und üben eine Kraft auf die benachbarten Körper aus. Die eingesetzten piezoelektrischen und magnetostriktiven Ultraschallwandler schwingen meist longitudinal, das bedeutet, dass die schallabstrahlende

Fläche des Schwingers sinusförmig um die Ruhelage der Fläche schwingt. Moderne Ultraschallschweißgeräte sind überwiegend mit piezoelektrischen Konvertermodellen ausgestattet, die einen Wirkungsgrad bis zu 98 % besitzen [DVS 2216-1, Wod04, Neh12].

Die ausgelösten Schwingungen werden an den mit dem Konverter mechanisch verbundenen Booster – auch Amplitudentransformationsstück bezeichnet – übertragen. Diese mechanische Ankopplung besteht in einem Schwingungsknoten des Boosters [Neh12]. Die Schwingungsamplitude wird geometriebedingt mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1 bis maximal 1 : 3 übermittelt [Bal09].

Gegenwärtig sind viele Ultraschallschweißanlagen mit einem Pulsweitenmodulator (PWM) mit nachgeschaltetem Tiefpassfilter ausgestattet. Dieser dient zur Erzeugung der hochfrequenten elektrischen Wechselspannung. Diese Maßnahme erleichtert die kontinuierliche Zugabe konstanter Ausgangsspannungen in den Konverter abgesehen von der Eingangsspannung. Für den Schweißprozess bedeutet das, dass die Veränderungen an die Netzspannung die Amplitude und die Leistung nicht beeinflussen [Kuh06].

Laut [Kor06] besteht die Aufgabe eines PWM darin, ein analoges in ein digitales Signal zu wandeln, wobei das Tastverhältnis G (Einschaltdauer/Periodendauer) proportional zur analogen Eingangsspannung ist. Darum stellt die PWM eine simple Möglichkeit dar, analoge Signale für digitale Systeme aufzubereiten. Hierdurch ergibt sich das Tastverhältnis nach [Lud04, Kuh06] wie folgt:

$$G = \frac{G_{\text{ein}}}{G_{\text{ein}} + G_{\text{aus}}} \quad (3.5)$$

Für den Mittelwert der Spannung gilt:

$$U_m = U_{\text{aus}} + (U_{\text{ein}} - U_{\text{aus}}) \cdot G \quad (3.6)$$

Aus dieser Gleichung lässt sich nach [Kuh06] erkennen, dass der Spannungsmittelwert (PMW) überwiegend von der Einschaltspannung des PMW abhängig ist. Das Tastverhältnis spielt eine entscheidende Rolle bei der Umstellung der eingegangenen Gleichspannung in eine hochfrequente Wechselspannung des Leistungsmoduls.

Im Falle einer genauen Steuerung eines ohmschen Verbrauchers muss die Leistung während der Ein- und Ausschaltzeit getrennt betrachtet werden:

$$P = \frac{U_{\text{ein}}^2}{R} \cdot \frac{G_{\text{ein}}}{G_{\text{ein}} + G_{\text{aus}}} + \frac{U_{\text{aus}}^2}{R} \cdot \frac{G_{\text{aus}}}{G_{\text{ein}} + G_{\text{aus}}} \quad (3.7)$$

3.3.3. Booster

Der Booster ist ein Halbwellenlängen-Resonanzelement, dessen Funktion es ist, das Schwingersystem in der Maschine zu lagern [Wod04] sowie die Schwingungsamplitude durch seine Bauform zu variieren und dadurch die gewünschten Schwingungsstärke an die Sonotrode und somit an die Fügeteile einzurichten. Um die Amplitude zu modifizieren, muss der Booster unterschiedliche Durchmesser an beiden Seiten seiner Mitte haben. Bei moderenen Anlagen ist es möglich, die Amplitude der elektrischen Feldstärke durch Reduktion der maximalen elektrischen Kapazität des Generators mittels elektronischen Reglers zu ändern. Diese Tatsache ermöglicht eine Variation der Schweißamplitude ohne Auswechslung des Boosters [Gre07].

Ein Booster mit einem kleineren Durchmesser am Ende, der mit der Sonotrode verbunden ist, wird die Amplitude erhöhen. Individuelle Booster mit höherer Verstärkung gehören mittlerweile zum Stand der Technik, aber um einen Bruch zu vermeiden, muss bei der Auslegung des Booster-Sonotroden-Systems die Widerstandfähigkeit der Sonotrode gegen höhere Amplituden sorgfältig betrachtet und angepasst werden [Rot04].

3.3.4. Sonotrode

Die Sonotrode gilt als wesentliches Schweißwerkzeug beim Ultraschallschweißen. Sie ist mit dem Booster mittels Schrauben- oder Lötverbindung direkt gekoppelt. Nicht selten werden die Sonotrode und der Booster aus einem Stück gefertigt. Die Sonotrode ist ein akustisches Gerät, deren Hauptaufgabe darin besteht, vom Booster übertragene Ultraschallschwingungen als $\lambda/2$ -Schwinger (halbe Schwingweite der abgegebenen mechanischen Schwingung) an den zu verschweißenden Fügepartnern zu übermitteln (peak to peak movement) [Gar65, Tou08]. Beim Ultraschallmetallschweißen gibt die Sonotrode durch die Arbeitsfläche die Vibrationen in das sonotrodenseitige Fügeteil ab und übermittelt die erforderliche Anpresskraft [Wod04]. Während dieses Vorganges entstehen Schwingungen mit Amplituden von 10 bis 80 μm [Dil05].

Weitere Aufgaben der Sonotrode sind, den notwendigen Druck zu bilden, der notwendig ist, um die Schweißnaht zu erzeugen, nachdem die Fügefläche der zu schweißenden Werkstücke geschmolzen wurde. Beim Ultraschallumformen übernimmt die Sonotrode die Schneidfunktion (zum Beispiel beim Trennen) sowie die Formgebung (zum Beispiel Nieten, Bördeln etc.) [DVS 2216-1]. Der Generator, der Booster und die Sonotrode stehen während des Ultraschallschweißprozesses in Resonanz.

Darum muss die mechanische Resonanzfrequenz auf die Ultraschall-Arbeitsfrequenz der Ultraschallschweißmaschine abgestimmt werden [Pot04].

Bei der Auslegung der Sonotroden-Geometrie für die jeweilige Aufgabenstellung muss die erforderlichen Amplitude erreicht werden. Zur Herstellung von qualitätsgerechten und reproduzierbaren Schweißverbindungen wird heutzutage die Sonotrode während der Konstruktionsphase mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) berechnet und optimiert, damit eine gleichmäßige Amplitudenverteilung an die Fügezone gewährleistet werden kann. So können Querschwingungen oder unregelmäßiges Vibrationsverhalten frühzeitig erkannt und beseitigt werden [Str95, Neh12]. Ein wichtiger Aspekt bei der Sonotrodenherstellung ist die Auswahl des Sonotrodenmaterials, deren Homogenität und Isotropie direkt die Schallentstehung und -geschwindigkeit sowie Amplitudenverteilung beeinflussen kann. Neben hohen Festigkeitseigenschaften und hoher Verschleißbeständigkeit müssen die ausgewählten Werkstoffe eine geringe Schallabsorption und Phasenumwandlung im Temperaturbereich aufweisen [Bas99]. Das zeigt, dass Sonotrodenwerkstoff, Form und Oberflächengüte eine wesentliche Rolle beim Bindungsmechanismus und der zu erwartenden Schweißgüte spielen. So ist die Haftungsbedingung einer angerauten Sonotrodenspitze besser und dadurch wird das Anlegieren an der Sonotrode verhindert. Darum werden die Sonotroden vorwiegend aus Aluminiumlegierungen, Ferrotitanit, gehärteten Stählen und Titan gefertigt [Wod80, Str95]. Während des Schweißvorganges stehen die Fügepartner im direkten Kontakt mit der Sonotrodenspitze. Darum sollten sie zur Minimierung der Verschleißerscheinungen eine geringere Dicke als das Sonotrodenmaterial besitzen. Nach Einlegen der beiden Fügeteile stößt die Sonotrode auf diese durch die Schweißpresse. Das Aufliegen der Sonotrode wird über eine Kraft-Wege-Steuerung überwacht (entweder über Messung der Schwelle des Kraftsystems oder durch Messung des Wegsignals der Servopresse) [Neh12].

Die Dicke des Schweißmaterials setzt wegen der hohen Schallabsorption eine Grenze zum Einsatz dieses Verfahrens. Im Gegensatz dazu erlaubt das Ultraschallschweißen die Erzeugung von Verbindungen zwischen dünnem Folienmaterial und massiven Werkstücken [Sch97]. Beim Einsatz von planen Sonotrodenspitzen soll eine dauerhafte Planparallelität zum oberen Fügepartner existieren, da eine minimale Verkantung die Druckverteilung in der Fügezone ändern kann. Dies kann vor allem in der Serienfertigung zu einen großen Abweichung der Festigkeitswerte und zu Rissbildung führen [Wod80].

3.3.5. Amboss

Die Sonotrode und der Amboss spielen eine entscheidende Rolle bei der Herstellung hochqualitativer Schweißverbindungen. Die Fügepartner werden zwischen den beiden Werkzeugen positioniert und fixiert. Die beiden Werkzeuge müssen gegeneinander genau ausgerichtet und eingestellt werden, damit eine axiale Kraftaufnahme in der Fügezone erfolgt sowie seitliches Umsiedeln der beiden Schweißpartner verhindert wird. Der Amboss sollte so konstruiert werden, dass während der Schwingungseinleitung von der Sonotrode in die Werkstücke keinerlei Aufbiegung oder Verformung entsteht [NL96, Dev01, Neh12]. Der Ambosswerkstoff muss einen hohen Schallwiderstand haben, damit eine Aufnahme von Schwingungsenergie verhindert wird und gleichzeitig durch Reflektion eine stehende Welle entsteht. Härtere Ambosswerkstoffe führen zu höheren Verbindungsfestigkeiten [Gro63, Wod80]. Weitere Untersuchungen zur Abhängigkeit von Ambossmaterial und Verbindungsfestigkeit sind in [Leh64] und [Eich67] enthalten.

Man kann in diesen Zusammenhang zwischen zwei Abschlusskonzepten, schallharte und schallweiche, unterscheiden (Abbildung 3.5).

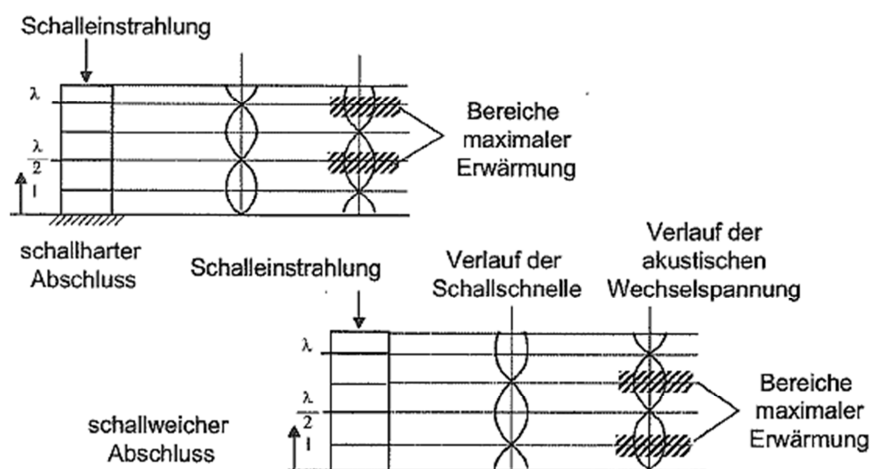


Abbildung 3.5: Stehende Welle bei schallhartem beziehungsweise schallweichem Abschluss [Pot71, Kuh06]

Bei einem schallharten Abschluss ist die Schallschnelle in die Kopplungsebene zwischen unterem Fügepartner und Amboss gleich Null und die zugeführte Wechsellspannung maximal. Bei dem schallweichen Abschluss hingegen ist die Schallschnelle maximal und die Wechsellspannung Null [Pot71, Kuh06]. Zur Herstellung von Schweißverbindungen mit ausreichender Qualität und höherer Festigkeit muss eine Relativbewegung zwischen den beiden Fügepartnern kreiert werden. Auf der anderen Seite muss die Relativbewegung zwischen der Sonotrode und dem oberen Fügepartnern so gering wie möglich gehalten werden,

so können die Verluste der mechanischen Vibrationsenergie unter Kontrolle gehalten werden [Wod80]. Matrinek [Mar96] konnte erfolgreich die Schwingungsweite des Ambosses während des Ultraschallschweißprozesses von Metallen messen und versuchte die Ambossamplitude als Prozessgröße zu betrachten. Auf Basis dieser Beobachtungen versuchte Adam [Ada95⁺, Sch98] diesen Zusammenhang zu beweisen. Dafür führte er Untersuchungen unter Betrachtung der Schwingweite am Amboss, mittels hochauflösenden induktiven Wegmeßsystemen mit Fast-Fourier-Transformation, durch. Er stellte fest, dass dieser Zusammenhang bei Variation der Versuchsbedingungen, insbesondere der Versuchswerkstoffe und der Ambossoberfläche nicht reproduzierbar ist. Tietze [Tie97] hat das dynamische Schwingungsverhalten sowie die sich daraus ausbreitete mechanische Welle im Amboss und deren Einfluss auf die Schweißnahtqualität untersucht. Er stellte fest, dass eine optimierte Ambosskonstruktion Kavitationsserscheinungen sowie Wellenausbreitungsvorgänge reduziert und somit eine bessere Schweißnahtqualität erzielt werden kann. Es gibt zahlreiche weitere Untersuchungen zum Einfluss des Amboss auf die Verbundmechanismen bei anderen Fertigungsverfahren. Hahn [Hah08] erwähnte, dass die Anwendung eines flachen Ambosses als Gegenwerkzeug beim Impulsfügen erhöhte Rissneigung im Niet, im Vergleich zu Formmatritzen, verursachen kann.

Weiterführende Literatur zur Betrachtung des Schwingungsverhaltens des Ambosses beim Ultraschallschweißen ist nicht bekannt. Die Ambossgeometrie mit verschiedenen Rändelformen und deren Einfluss auf die Mikrostrukturen sowie die Schweißnahtfestigkeit bei Ultraschallschweißen von Aluminiumlegierung AA6111-T4 hat Jahn [Jah07] untersucht. Diese Rändelformen werden üblicherweise beim Ultraschallschweißen von Metallen an die Sonotrodenspitze eingeprägt. Dabei stellte er fest, dass die Rändelform bei gleicher Schweißenergie zur Variation der Schweißnahtfestigkeit führt. In gleichen Zusammenhang bemerkte Shin [Shi15], dass die Scherzugfestigkeit sinkt umso feiner die Rändelgeometrie am Amboss und Sonotrode wird.

Die notwendige Relativbewegung während des Schweißprozesses wird durch die präzise Fixierung der Fügepartner im Amboss realisiert. Anhand prozess- und werkstoffbasierter Bedingungen wird ein Teil der zugeführten Sonotrodenschwingung in Relativbewegung zwischen den Fügepartnern umgesetzt. Bei der Wahl optimierter Schweißbedingungen wird ein maßgeblicher Anteil der zugeführten Schwingungsamplitude in Relativbewegung abgewandelt. Im Gegenteil findet bei Auswahl ungeeigneter Prozessparameter keine Relativbewegung und somit keine Verschweißung statt [Reu92, Bal09].

3.3.6. Schweißpresse

Die Schweißpresse ist für die Erzeugung der erforderlichen Halt- und Schweißkraft zuständig. Die Resonanzeinheit ist an die Schweißpresse gekoppelt, dessen Bewegung die Sonotrode in eine Vorschubbewegung treibt. Zurzeit sind auf dem Markt sowohl pneumatische als auch servoelektrische Schweißpressen vorhanden. Beide Ausführungen ermöglichen kurze Regelzeiten für die erforderliche Schweißkraft. Mit der servoelektrischen Presse kann eine millisekundliche Einstellung der Fügegeschwindigkeit erfolgen [Ehr04, Kuh06]. Für solche Schweißpressen ist ein Servoventil mit kurzer Umschaltzeit erforderlich. Dieses Ventil dient zur Erzeugung einer pneumatischen Vorschubkraft, die wiederum über eine Druckluftsteuerung kontrolliert wird und während des Schweißprozesses stabil gehalten wird mit einer Genauigkeit von 0,01 mm über den gesamten Schlittenhub von 200 mm [Mic93, Ehr04]. Bei den meisten pneumatischen Schweißpressen wird ein Messgerät und servopneumatischer Regler verwendet, um die Höhe des Luftdrucks im Zylinder während der Schweißung zu steuern [Duk11].

Ein zu niedrig eingestellter Druck in der pneumatischen Schweißpresse kann zu Vibrationen und zur verspäteten Beaufschlagung der erforderlichen Schweißkraft führen, was auch eine Senkung der Schweißnahtqualität zur Folge haben kann [Neh12]. Durch die Eigenschaften des eingesetzten Mediums Luft, wie Kompressibilität und Temperaturabhängigkeit, wird die Grenze der Regelgenauigkeit bei den Proportionalregelventilen eingestellt [Zic00].

Die pneumatischen Schweißpresse ermöglichen eine Kraftaufbringung von 1 bis 7 MPa und sind standardmäßig als eine steife und leichtgängige Präzisions-Vorschubeinheit in Modulbauweise definiert. Sie sind mit einem speziellen Kraft- und Wegemesssystem ausgestattet, deren Genauigkeit bei 0,01 mm über dem kompletten 100 mm langen Schlittenschub liegt [Str95].

Die Schweißkraft und der Weg spielen eine entscheidende Rolle bei der Steuerung und Regelung des Schweißprozesses. Während die Amplitude über den Generator gesteuert wird, wird die Schweißkraft über ein Druckventil geregelt [NN92, Hab03]. Der Modus Zeit und Energie hingegen spielen aus der heutigen Sicht wegen der Prozessveränderungen während der Schweißungen von technisch unkomplizierten Bauteilen nur eine Nebenrolle. Die heutigen Möglichkeiten, ein Wegmessungssystem einzusetzen, machen die Aufnahme der Zeit und des Weges als stets wichtige Steuergrößen. Darum werden nunmehr der „relative Weg“ und der „absoluter Weg“ der Schweißpresse als prozessverbundene Faktoren betrachtet. Der „relative Weg“ ist der Weg, den die Schweißpresse vorrückt während der Erregungsphase

des Ultraschalls. Diese Größe ermöglicht die Steuerung und einen Ausgleich der Fertigungstoleranzen und eine gleichbleibende Schweißnahtfestigkeit der Fügepartner. Der „absolute Weg“ ist der Weg, den die Schweißpresse während des Einschaltens der Schweißenergie vorankommt. Somit ist das Ende des Schweißprozesses nicht von eingestellten Energiewerten des Schweißvorgangs abhängig, sondern von der Erreichung des Endmaßes der zu schweißenden Fügepartner [Hab04]. Heutzutage sind viele Ultraschallschweißmaschinen mit einem frei programmierbaren Antriebsaggregat ausgestattet. Dieses erlaubt eine genaue Erforschung der Sonotrodenposition durch ein diskretes Absolut-Wegmesssystem mit ständiger Ermittlung der Ausgangsposition. Dadurch werden die unnützen Hubwege der Sonotroden und somit lange Zykluszeiten vermieden [NN13].

3.4. Energieumwandlung

Während des Ultraschallschweißens werden in der Fügezone hochfrequente, longitudinale Schwingungen (Abbildung 3.6) durch die Sonotrode übermittelt. Dadurch entsteht in den Fügeteilen eine stehende Schallwelle im Frequenzbereich zwischen 20 und 70 kHz mit Amplituden von 10 bis 80 μm [Kuh06].

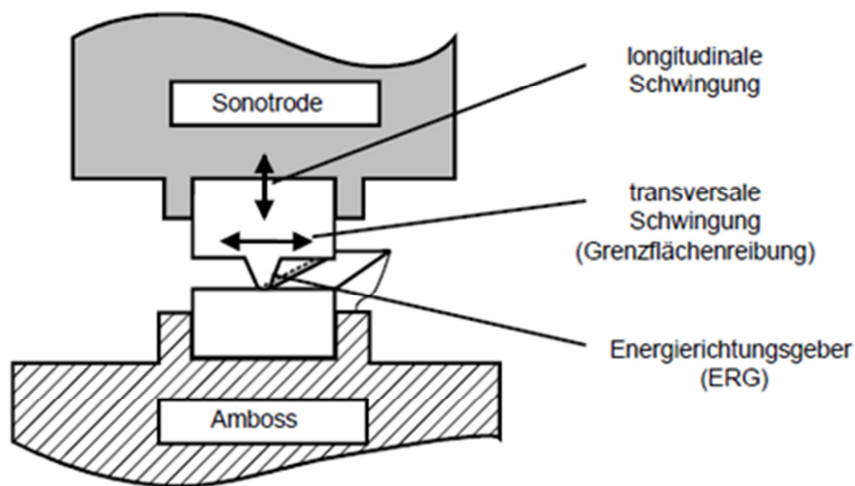


Abbildung 3.6: Aufgetretene Schwingungen in der Fügezone [Kos07]

Durch Auftreten von elastischer Hysterese, lokalisiertem Grenzflächengleiten und plastischer Verformung beginnt der Werkstoff an der Stelle maximaler Wechsel-Dehnung beziehungsweise-Spannung zu schmelzen [Cha74]. Die durch innere Reibung plastifizierte Fügeteile werden durch die Anpresskraft der Sonotrode aus der Stelle maximaler Energieumwandlung ausgepresst, dehnen sich aus und grenzen mit der Kontaktfläche der

anderen Fügeile an. Die Schmelze wirkt als Schallabsorber. Darum wird kontinuierlich Schallenergie in Wärme umgewandelt (Abbildung 3.7). Dadurch steigt die Temperatur des bereits geschmolzenen Materials und die Schweißung breitet sich über die gesamte Fügezone aus [Pot71].

Die maximale Amplitude des Schweißvorganges tritt am Eingang der ERG auf, während die Berührungsfläche mit dem unteren Fügepartner die kleinste Amplitude aufweist. Die maximale Dehnung $\hat{\varepsilon}$ ergibt sich aus dem Quotienten der Differenz der Schwingungsamplitude und der Höhe der ERG [Pot84, Kuh06].

$$\hat{\varepsilon} = \frac{\Delta A}{H} \quad (3.8)$$

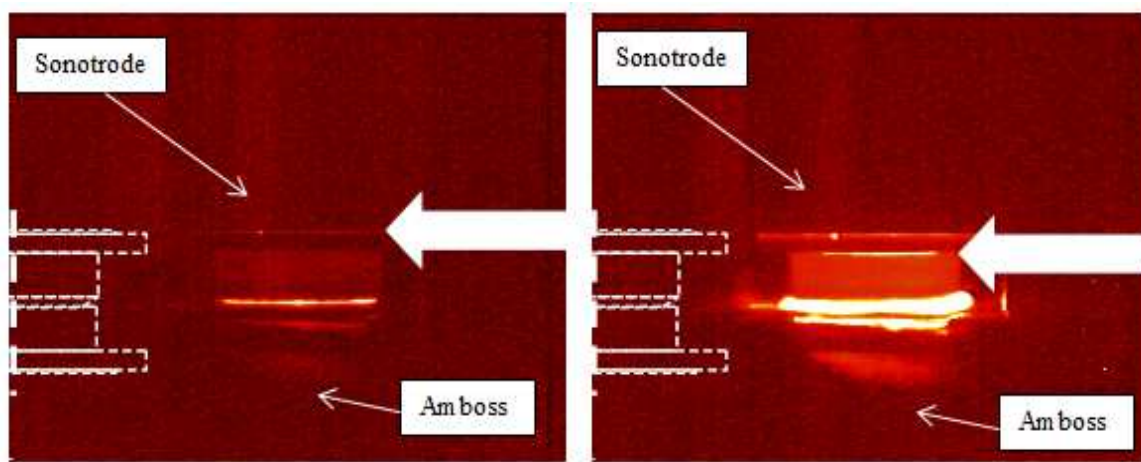


Abbildung 3.7: Wärmebildung in der Fügezone beim Ultraschallschweißen [NN14⁺]

Nach [Ben87; Kuh06] lauten die Schubspannungsgleichungen für die Formänderung beim ERG:

$$\sigma^*(t) = \sigma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi)} \quad (3.10)$$

Das komplexe Schubmodul ergibt sich wie folgt:

$$E^* = E' + iE'' = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} \quad (3.11)$$

Durch Multiplikation der Gleichung mit der Querschnittsfläche lassen sich die Federsteifigkeit c_f und der Dämpfungskoeffizient k nach dem Voigt-Kelvin-Modell für viskoelastische Körper berechnen:

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} \cdot S = (E' + iE'') \cdot S = c_f \cdot H + i\omega \cdot k \cdot H \quad (3.12)$$

wobei:

$$c_f = \frac{E'}{l} \cdot S \quad (3.13)$$

$$k = \frac{E''}{\omega \cdot l} \cdot S \quad (3.14)$$

Nach [Pot04] lässt sich die dem ERG zugeführte Schallenergie in einen reversiblen und einen irreversiblen (setzt sich in Wärme um) Anteil gliedern. Dieser Vorgang ist vom Fügedruck abhängig, der wiederum von der statischen Anpresskraft und der Querschnittsfläche des Fügeteils beeinflusst wird. Man unterscheidet bis zum Anschmelzen zwei Energieumwandlungsmechanismen. Beim steilen Anstieg des statischen Anpressdrucks über die Zeit erfolgt die Umwandlung durch die innere Reibung und den Grenzflächenreibunganteil. Daraus lässt sich die Energiegleichung wie folgt berechnen:

$$(\pi\eta + 2m\mu) \cdot \hat{\varepsilon}^2 \cdot f \cdot E = \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3.15)$$

Der Parameter m lässt sich aus empirischen Beobachtungen wie folgt beschreiben:

$$m = 0,25 \cdot \left[1 - \left(\frac{p}{p_k} \right)^{0,7} \right] \quad (3.16)$$

Der statische Anpressdruck p_k ist derjenige Druck, bei dem noch keine Reibung an der Grenzfläche entsteht [Pot71⁺]. Beim flach ansteigenden Anpressdruck erfolgt die Energieumwandlung nur durch die innere Reibung. Für die Energiegleichung gilt dann:

$$\pi \cdot \eta \cdot E \cdot \hat{\varepsilon}^2 \cdot f = \rho \cdot c \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3.17)$$

wobei η ein Dämpfungsfaktor ist und sich nach [Elb88, Kuh06] wie folgt ergibt:

$$\eta = \frac{U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi}{4\pi^3 \cdot f_p \cdot m_s \cdot A^2 \cdot (f_p^2 - f_0^2)} \quad (3.18)$$

Laut [Non96] erfolgt der Mechanismus der Wärmeerzeugung in dem Ultraschall-Schweißprozess über viskoelastische Abfuhr und zyklische Verformung des Kunststoffes. Die Dissipationsenergie hängt vom Elastizitätsmodul und dem Verlustwinkel der Kunststoffe ab. In einem rein elastischen Material beträgt der Verlustwinkel null und somit findet keine Dissipation statt. In einem rein viskosen Material ist der Verlustwinkel (Phasenwinkel zwischen Verformung und Spannung) gleich 90 °, aber das Elastizitätsmodul geht gegen Null. Beim Erhitzen erweicht sich der Kunststoff und der E-Modul fällt in die Nähe der Glasübergangstemperatur für amorphe und Schmelztemperatur für teilkristalline Kunststoffe ab. Gleichzeitig steigt der Verlustwinkel schlagartig. Diese Energie ist zusätzlich proportional

zum Quadrat der lokalen Belastung. Da die zwei Grundnahtgeometrien eine Linienberührung besitzen und daher die lokale Belastung für beide Fügepartner gleich groß ist, konzentriert sich der Dissipations- und Plastifizierungsprozess in der Schweißzone [Non96]:

$$E_{\text{diss}} = \frac{A^2 \cdot \omega \cdot E \cdot \sin \delta}{2} \quad (3.19)$$

3.5. Prozessablauf beim Ultraschall-Kunststoffschweißen

Wie bereits erwähnt erfolgt beim Ultraschallschweißen die Erzeugung von stoffschlüssigen Verbindungen zwischen den Fügeteilen durch Anwendung von mechanischer Energie durch die Sonotrode. Diese mechanische Energie wird genutzt, um eine innere Reibung durch oszillierende, translatorische Relativbewegung bei gleichzeitiger Zugabe von statischer Anpresskraft zu entwickeln [Pot04].

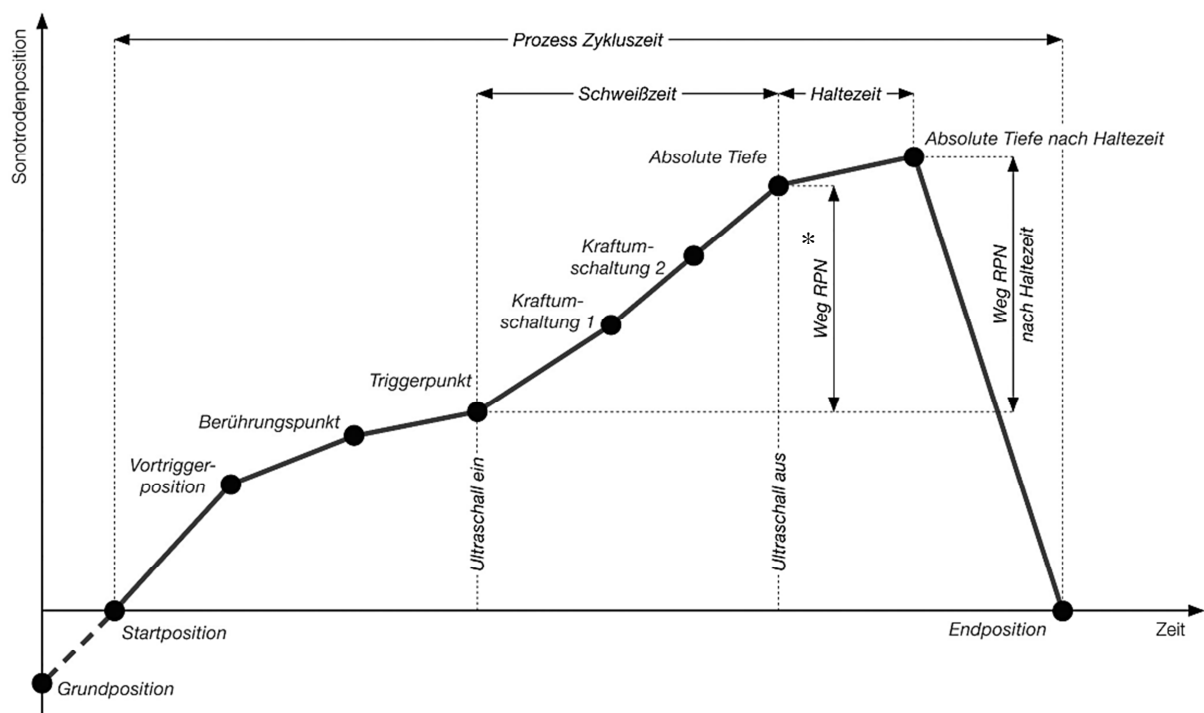


Abbildung 3.8: Prozessablauf beim Ultraschall-Kunststoffschweißen nach [NN13]
Weg RPN* = Absmelzweg, gemessen vom Referenzpunkt

Während des Schweißprozesses müssen die drei relevanten Prozessgrößen Amplitude, Schweißdruck und die Schweißenergie auf die gewünschte Schweißverbindung abgestimmt werden [Bor04, Eif09].

Diese Prozessgrößen müssen vor und während des gesamten Schweißprozesses so eingestellt werden, dass eine gegenseitige Abhängigkeit fernbleibt. Wegen dieser gegenseitigen Wechselwirkung muss die Parametergröße für die Fügeteile vorher erstellt werden. So kann

zum Beispiel bei Erhöhung der Amplitude oder Schweißkraft eine Reduzierung der Schweißenergie vermieden werden [Gode95, Eif09].

Die Zykluszeit für einen Ultraschallprozess ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Dies beschreibt die Sonotroden-Position nach Prozessbeginn. Nach Betätigung der Starttaste fährt die Sonotrode auf die Fügeteile. Nach Berührung der oberen Fügepartner beginnt die vorher eingestellte Triggerzeit. Mit dem Ablauf dieser Zeit wird die Ultraschall für die ebenfalls vorher eingestellte Schweißzeit eingeschaltet und die mechanische Schwingungen werden ins Fügeteil eingeleitet. Der Generator hält durch Einstellung der Anregungsfrequenz im Konverter die Amplitude während des gesamten Schweißprozesses konstant [Neh12]. Die Kraftumschaltungsphasen sind herstellerbedingt und begünstigen eine bessere Einstellung der Schweißkraft. Die Schweißkraft ist eine entscheidende Parametergröße für die Ankopplungs- und Fließbedingungen während der Schweißphase.

Dadurch wird das Schweißkraftsprofil zweistufig vorgegeben. Die Maschine beginnt in der ersten Phase mit höherer Schweißkraft, die in zweiter Stufe bis Prozessende reduziert wird. Die Realisierung dieser Maßnahme basieren auf Untersuchungen von Michaeli [Mic96]. Damit wurde gezeigt, dass bei Kraftumstellung die Schweißnahtfestigkeit durch verbesserte Einstellung der Eintritts- und Verweilzeiten um 30 % steigt. Die Umschaltung der Schweißkraft verläuft während der Schweißzeit innerhalb von 55 ms und wird über zusätzlich installierte servopneumatische Druckregelung realisiert.

Mit Abschluss der Schweißzeit hat die Sonotrode die Absolute Tiefe bzw. den Schmelzweg erreicht. Dies steigt ebenfalls während Phase der Haltezeit. Nach Ablauf der Haltezeit reduziert sich die Druckluft in der Schweißpresse und die Sonotrode fährt auf ihre Startposition zurück.

Der Prozessablauf beim Ultraschallschweißen thermoplastischer Fügeteile wird in folgende Phasen unterteilt:

- Abschmelzen des ERG
- Ankopplung zwischen Ober- und Unterteil
- stationäre Abschmelzphase
- statische und dynamische Haltephase

3.5.1. Abschmelzen des Energierichtungsgebers (ERG)

Nach dem Aufschlagen der Sonotrode auf das obere Fügeteil wird eine konstant gehaltene Anpresskraft auf das Werkstück ausgeübt. Die Anwendung dieser Kraft ist an eine

elektronisch gesteuerten Verzögerungszeit gebunden. Diese Verzögerungszeit ist von den Dämpfungseigenschaften und vom Schweißzustand abhängig. Nach Ablauf dieser Zeit wird die Anpresskraft konstant und der Schwingungsmechanismus beginnt [Bas99]. Dadurch werden die mechanischen Schwingungen von den Fügeteilen absorbiert und reflektiert. Dann setzt sich eine Kette von physikalischen Vorgängen wie Dissipation, elastische Hysterese, plastische Verformung sowie Molekular- und Grenzflächenreibungsreaktionen in Gang, was zur Erwärmung und Erweichung des Kunststoffes führt [Cha73,Sto89]. Durch kontinuierlichen Anstieg der Temperatur erhöht sich die Dämpfung des Kunststoffes und die Absorption der mechanischen Schwingung, was zur beschleunigten Umwandlung der Energie in Wärme führt. Die erhöhte Dämpfung der Sonotrode führt zur Erhöhung des Stromflusses im Generator und somit zum Anstieg der Leistung [Rit86]. Aufgrund der dreieckigen Querschnittsgeometrie der ERG weist diese am Anfang des Fügeprozesses hohe Abschmelzgeschwindigkeit durch die Hystereseverluste auf. In diesem Zusammenhang ist wichtig zu erwähnen, dass bisher die meisten Anwender der Meinung waren, dass die steigende Temperatur während des Ultraschallschweißvorganges aus der Grenzflächenreibung an den Berührungsflächen erzeugt wird. Jedoch haben die experimentellen Ergebnisse von Menges [Zon09 zitiert aus Men96] gezeigt, dass die Hauptwärmewirkung beim Ultraschallschweißen durch viskoelastische Dissipation (Erwärmung) [Vil10] anstatt Grenzflächenreibung entsteht. Die viskoelastische/viskoplastische Erwärmung kann durch das mechanische Verhalten der Kunststoffe verstanden werden. Dieses Verhalten wird durch den komplexen Schubmodul beschrieben (Gleichung 3.11). Kunststoffe die viskoelastisches Verhalten aufweisen, verhalten sich gleichzeitig elastisch und viskos [Gre03]. Das Materialverhalten der Kunststoffe verläuft innerhalb des gesamten Schweißprozess nach Beginn der Schweißzeit erstmal viskoelastisch und wird nach Ende der Haltezeit viskoplastisch. Verschiedene Literaturstellen bestätigen, dass sich der Entstehungsmechanismus der Wärme mit dem Modell der viskoelastischen Dissipation unter Belastung erklären lässt [Non96, Gut02, Zon09].

Die zunehmende Anpresskraft bewirkt eine Senkung der Abschmelzgeschwindigkeit der ausgedehnten Fläche der ERG und einen Abstieg der Flächenpressung [Pot04, Neh12]. In dieser Phase führen die noch geringen Reibungsvorgänge zwischen den beiden Fügeteilen zur Reduzierung des elastischen Verformungszustandes des ERG und zum Beginn des Aufschmelzvorganges an deren Spitze.

Nach [Ehr04, Fri14] sind die entstandenen Belastungen während der trockenen Reibungsprozesse von Adhäsions- und Deformationionsvorgängen geprägt. Bei glatten

Oberflächen und geringer Flächenpressung dominieren die Erscheinungen der Adhäsion verursacht durch die molekularen Bindungskräfte, welche den Relativbewegungen zwischen den beiden Materialien entgegenwirken. Mit zunehmender Oberflächenrauheit und zunehmendem Anstieg der Anpresskraft beherrschen die Deformationsvorgänge, die durch mechanische Verhakungen ausgelöst werden. Nach [Bas99] unterteilt sich die Reibenergie, die während des Ultraschallvorganges entsteht in zwei Reibungsprozesse.

Die äußeren Reibungsprozesse sind von der Reibwert geprägt und sind von stofflichen Eigenschaften der Fügteile wie Oberflächenbeschaffenheit, Gleitgeschwindigkeit, Dicke sowie der Anpresskraft und Schweißtemperatur abhängig. Die inneren Reibprozesse sind hingegen von der geometrischen Gestaltung des Schweißsystems und der Spannungs-Dehnungsreaktion während des Schweißprozesses abhängig. Die durch die beiden Prozesse hervorgerufenen Energiemengen beim Ultraschallschweißen $E_{äuR}$ und E_{inR} werden durch die schlagartige Krafteinbringung in die Fügezone durch die Sonotrode in Wärme umgewandelt. Während des Ultraschallschweißens ist die äußere Energie $E_{äuR}$ vom Flächenwachstum der Fügezone $S(t)$ abhängig. Gleichzeitig ist die innere Energie von der mathematischen Integration von $S(t)$ mit $0 \leq S(t) \leq S_0$ abhängig.

$$\xi(t) = q_1 \cdot S(t) + q_2 \cdot \int_0^t S(t) \cdot dt \quad (3.20)$$

ein Ausgleich durch die scheinbare Oberfläche S_0 ergibt:

$$\frac{\xi(t)}{S_0} = q_1 \cdot \frac{S(t)}{S_0} + q_2 \cdot \int_0^t \frac{S(t)}{S_0} \cdot dt \quad (3.21)$$

wobei q_1 der Faktor für die durch äußere Reibung in die Fügezone zugeführte Energie und q_2 der Faktor für die durch die innere Reibung eingebrachte Leistung ist [Bas99].

$$q_1 = \frac{dE_{äuR}}{dS} \quad (3.22)$$

$$q_2 = \frac{dP_{in}}{dS} \quad (3.23)$$

3.5.2. Ankopplung zwischen oberen und unteren Füge teil

Diese Phase des Schweißprozesses ist wie die ersten durch instationäre Vorgänge aufgrund weiterlaufender geometrischer Änderung der Fügeebene gekennzeichnet. Diese führen zum kompletten Aufschmelzen des ERG und zur Weiterbildung der entstandenen Schmelzschicht zwischen den beiden Fügteile. Zu Beginn dieser Phase hat sich der Schwingungszustand der Sonotrode noch nicht stabilisiert, da die Ultraschallleistung noch nicht auf den erforderlichen

Wert umgeschaltet und somit die Resonanzfrequenz noch gefunden werden muss [Kor96, Zie00]. Die niedrige Abschmelzgeschwindigkeit unter ERG ist durch eine kurze Stabilisierung der Temperatur und des mechanischen Verlustfaktors konstant. Die Temperatur des Materials, das direkt mit der ungeschmolzenen Seite des ERG kontaktiert wird, sinkt. Durch Erhöhung der Anpresskraft und der Wechsellastspannung an der ERG erhöht sich der Verlustfaktor in der Schmelze im Vergleich zum Grundmaterial und die Energieabsorption in der Fügezone, was zur weiteren Schmelzebildung und Ankopplung der Fügeteile führt [Rit86, Pot04]. Die Anpresskraft bewirkt eine Erhöhung des Schmelzeaustritts und eine Reduktion der Viskosität, die den Schmelzeaustritt beschleunigt. Dies trägt bei hohen Temperaturen zu einem Gleichgewichtszustand zwischen erzeugter und abfließender Schmelze bei [Rit86]. Der kontinuierliche Abschmelzprozess führt laut [Kor96, Non96] wiederum zur Senkung des Fügedrucks und der viskoelastischen Dissipation infolge der größer werdenden Fügezone.

3.5.3. Stationäre Abschmelzphase

Diese Phase ist durch Erreichen einer gleichbleibenden Schmelzedicke und konstantem Anstieg des Schweißweges geprägt und wird durch Abstellung der Ultraschallenergie beendet. Das führt zur konstanten geometrischen, rheologischen und thermischen Situation in der ERG [Kuh06]. Die inneratomaren Kräfte leiten den eigentlichen Fügevorgang durch Annäherung von Kristallen der Gitterstruktur und Gitterebenenorientierung ein [Böh92].

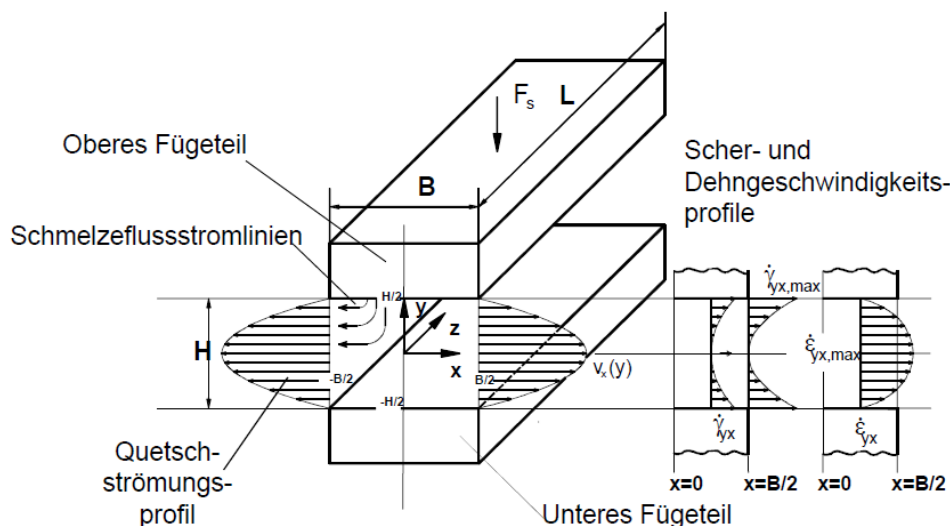


Abbildung 3.9: Fließen in der Fügeebene beim Ultraschallschweißen [Net92, Kos07]

Die Schmelzedicke ist mit der Kraft und Amplitude sowie der statischen Temperaturverteilung in der Schweißzone verbunden. Die zeitliche Dauer dieser Phase ist nicht werkstoffabhängig. Vor allem bei Faserverbundwerkstoffen (Kurzglasfasern) kann die

zeitliche Dauer dieser Phase zur Neuorientierung der Faser in Strömrichtung bei gleichbleibendem Fügweg führen [Pot04].

Die gesamte Orientierung der Fasern bleibt während des gesamten Schweißprozesses annähernd erhalten [NN04]. Die stationäre Abschmelzphase wird nicht für jeden Gebrauch erfolgreich abgeschlossen. Die Geometrie der ERG und die angestrebte Schweißfläche müssen vorher theoretisch betrachtet und angepasst werden. Bei Abweichungen kann es zu einem raschen Anstieg der Generatorleistung und zur Bildung von Querschnittsprüngen kommen, was zum Abbruch des Schweißprozesses führen kann [Zie00].

Das folgende analytische Modell zur mathematischen Beschreibung der stationären Abschmelzphase haben [Net92] und [Mic96] unter Annahme vieler Faktoren zum Beispiel unter Betrachtung des Strömungsverhaltens als stationär und inkompressibel in x- und y-Richtung, konstanter Schmelzeschichtdicke, Vernachlässigung der Gravitationskräfte und der Haftbedingungen sowie der Schubspannung in y-z-Richtung laut Abbildung 3.9 wie folgt aufgestellt :

$$\tau_{yz} = K' \cdot \gamma_{yz}^n \quad (3.24)$$

Das Druckprofil wurde mit Hilfe des Kontinuitätssatzes unter der Annahme, dass v_y ein linear zunehmendes Druckströmungsprofil besitzt, beschrieben:

$$p(y) = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[1 - \frac{4 \cdot y^2}{B^2} \right] \quad (3.25)$$

$$p = \frac{F}{B \cdot L} \quad (3.26)$$

Die Geschwindigkeit v_y lässt sich durch die vereinfachte Form der Bewegungsgleichung, beschrieben:

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0 \quad (3.27)$$

$$v_y = \left(\frac{\partial p}{\partial y} \cdot \frac{1}{K'} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \left(z - \frac{H}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (3.28)$$

Durch Einsatz von Gleichung 3.25 ergibt sich die Geschwindigkeit v_y in y -Richtung:

$$v_y = \left(-\frac{1}{K'} \cdot \frac{12}{B^2} \cdot y \cdot p \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{n}{n+1} \cdot \left(z - \frac{H}{2} \right)^{\frac{n+1}{n}} \quad (3.29)$$

Durch Ableiten von v_y nach z ergibt sich die Schergeschwindigkeit:

$$\gamma_{yz} = \left(-\frac{1}{K'} \cdot \frac{12}{B^2} \cdot y \cdot p \right)^{\frac{1}{n}} \cdot z^{\frac{1}{n}} \quad (3.30)$$

Die maximale Schergeschwindigkeit erreicht ihren maximalen Wert am Übergang Grundmaterial/Schmelze ($z_0=H/2$) und ($y=B/2$):

$$\gamma_{yzmax} = \left(-\frac{6p}{B} \cdot \frac{1}{K'}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.31)$$

Durch Ableiten die Geschwindigkeit v_y nach y ergibt sich die Dehnungsgeschwindigkeit wie folgt:

$$\theta_{yz} = \left[\frac{1}{K'}\right]^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{1}{n+1} \cdot \left[z - \frac{H}{2}\right]^{\frac{n+1}{n}} \cdot \left[12 \cdot \frac{p}{B^2}\right]^{\frac{-n+1}{n}+1} \cdot y^{\frac{-n+1}{n}} \quad (3.32)$$

Die maximale Dehnungsgeschwindigkeit erreicht ihren maximalen Wert in der Schmelzschichtmitte ($z_0=0$) und ($y=B/2$):

$$\theta_{yzmax} = \left[\frac{1}{K'}\right]^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{1}{n+1} \cdot \left[-\frac{H}{2}\right]^{\frac{n+1}{n}} \cdot \left[-12 \cdot \frac{p}{B^2}\right]^{\frac{-n+1}{n}+1} \cdot \left[\frac{B}{2}\right]^{\frac{1-n}{n}} \quad (3.33)$$

3.5.4. Haltephase

Nach Abstellen der Schwingungsenergie fällt der dynamische Anteil der eingestellten Anpresskraft aus und die Fügezone verhärtet sich unter statischer Belastung. Durch Wegfall der dynamischen Belastung reduzieren sich die Ankopplungsbedingungen der Sonotrode sowie die viskoelastischen Schichteigenschaften der Schmelze in den Fügeteilen [Mic92, Pot04]. Die Sonotrode mit dem entstandenen Wagsprung übt nur noch eine statische Kraft in Richtung der Fügeteile aus und die restliche Schmelze wird ausgepresst (Weissenberg-Effekt). Während der Haltephase findet ein geringer Anstieg des Schweißweges statt. Dies ist sowohl auf die Schwindung des Kunststoffes während der Abkühlungsphase als auch auf das Ausfließen der Schmelze zurückzuführen [Mic92⁺, Neh12]. Es finden keine instationären thermischen und rheologischen Mechanismen statt und der Schweißvorgang ist bei Ende der Relativbewegung abgeschlossen [Mic00]. Laut [Wod04] ist die Erzielung einer bestimmten Schweißnahtfestigkeit von den einzelnen Schweißphasen abhängig. Eine minimale Festigkeit wird beim Erreichen der Abschmelzphase erreicht.

Es sind in der Literatur Modellbeschreibungen für die zeitliche Abnahme der Schmelzeschichtdicke beim Heizelement- und Vibrationsschweißen vorhanden. Diese können auf das Ultraschallschweißen übertragen werden, da keine weitere Energiezufuhr stattfindet [Pot87, Ueb95, Fri14]:

$$h(t) = H_0 \left[1 + \frac{(2)^{\frac{n+1}{n}} \cdot (2+n)^{\frac{1}{n}} \cdot (1+n)}{1+2n} \cdot \left(\frac{p \cdot H_0^{n+1}}{K' \cdot B^{n+1}}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot t \right]^{\frac{-n}{n+1}} \quad (3.34)$$

In der Literatur gibt es ausreichende Untersuchungen zum Einfluss von Schweißparametern auf die Schmelzeschichtdicke. Michaeli [Mic93] hat bei prozessanalytischen Untersuchungen beobachtet, dass eine Reduzierung der Anpresskraft in der Haltephase eine Zunahme der Schmelzeschichtdicke infolge geringer Orientierung der Schweißnaht bewirkt.

Potente [Pot87] hat beim Vibrationsschweißen die Schmelzedicke in Abhängigkeit vom Schweißdruck und von der Vibrationszeit untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass Fügedruck und Amplitude direkten Einfluss auf die Temperatur und somit auf die Schmelzeschicht haben. Laut dieser Untersuchungen wurde bemerkbar, dass die Schmelzeschicht wegen der am Anfang steigender Temperatur aufgrund der großen Scherung sehr schnell zunimmt. Nach Erreichung ihres Maximums sinkt die Scherung wieder und verläuft dann mit zunehmender Zeit konstant. Beim Heizelementschweißen gehört die Restschmelzeschichtdicke zum bedeutenden Parameter bei der Schweißvorgangsgestaltung. Kreiter [Kre87] hat festgestellt, dass die erreichbare Schweißnahtfestigkeit mit steigendem Fügeweg sowie steigender Schmelzeschichtdicke wächst. Weitere Untersuchungen sind in [Tol83 Ehr04, Pot04, Mic09] dargestellt.

Strohfuß [Str95] hat bei seinen Untersuchungen zur Steuerung des Ultraschallschweißens die Amplitudenprofile angewendet. Dabei wurde festgestellt, dass beim Absenken der Amplitude nach Erreichung der Haltephase die Schmelzeschichtdicke ca. 50 % zunimmt. Das führt zur Verbesserung der Nahtfestigkeit um 80 % und der Standardabweichung um 50 %.

Michaeli [Mic09] hat Untersuchungen zur Restschmelzeschichtdicke als Anhaltspunkt bei der Betrachtung des Ultraschallschweißvorganges durchgeführt. Dabei wurde ein neues leistungsfähiges Verfahren zur Messung dieser Größe entwickelt als Ansatz zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen ermittelten Werten und mechanischen Kenngrößen, wodurch die Schweißnahtqualität von ultraschallgeschweißten Bauteilen ebenfalls zunimmt. Im Rahmen seiner Untersuchung hat er festgestellt, dass die Restschmelzeschichtdicken für amorphe und teilkristalline Kunststoffe Schwankungen in Mikrometerbereich haben.

3.6. Stand der Anwendungsgebiete des Ultraschallschweißens

Das Ultraschallschweißverfahren hat sich in den letzten Jahren als sehr praktisches und anwendungsreiches Fügeverfahren etabliert. Neben dem Schweißen von Kunststoff- oder metallischen Verbunden bietet das Verfahren weitere Möglichkeiten zum Fügen von artfremden Werkstoffen. Darum sind die Zukunftsaussichten für ein weiteres Anwendungsspektrum optimistisch zu sehen. Stand der Technik sind

Ultraschallfügetechniken zum Punkt-, Torsions- und Rollnahtschweißen sowie Nieten, Bördeln, Verdämmen und Verschweißen von kleinen Fügeflächen und so weiter anhand von Ultraschall mittels starr automatisierter Schweißpressen, Sondermaschinen oder einfacher Handpistolen [Wag97⁺⁺].

Dieses Verfahren hat sich historisch als Fügeverfahren für thermoplastische Kunststoffe und hybride Bauteile auch mit dreidimensionaler Fügenaht etabliert [Mic10]. Im Vergleich zu herkömmlichen Schweißverfahren wird das umweltfreundliche Ultraschallschweißen vorzugsweise verwendet wenn keine Zusatzstoffe oder Lösungsmittel zum Einsatz kommen müssen, aber auch wenn schnelle Prozesszeiten bei hoher Qualität, guter Verbundfestigkeit und präziser Reproduzierbarkeit der Schweißnähte gefragt sind [NN14].

Die wesentlichen Vorteile des Verfahrens laut [Rit14, NN15] können wie folgt zusammengefasst werden:

- Zykluszeiten im Zehntelsekunden-Bereich
- Gut automatisierbar mit der Möglichkeit, die Schweißparameter durch elektronische Kontrollsysteme zu überwachen
- Hohe Festigkeit zwischen den Fügepartnern ohne Einsatz zusätzlicher Medien
- Keine Beschädigungen der Fügteile mit homogener Gestaltung der Schweißnaht
- Geringer Energieverbrauch durch digitale Steuerung des Schweißprozesses im Vergleich zu thermischen Schweißverfahren

3.6.1. Polymer / Polymer-Faserverbund

Bereits seit Erfindung des Ultraschallschweißverfahrens wurden viele numerische und praktische Untersuchungen zum Schweißen verschiedener Thermoplasten durchgeführt (Tabelle 3.1). Zahlreiche Untersuchungen zum Ultraschallschweißen von Thermoplasten und deren Anwendung sind in der Literatur dargestellt [Men71, Tol83, Ben89, Gut02, Li04, Zon09, Sac15].

Trotz dieser umfangreichen Untersuchungen sind laut [Net92] immer noch viele Fragen bezüglich der Abhängigkeit zwischen Maschinenparameter, Fertigungsparameter, Prozessgrößen, Struktur der gewünschten Schweißnaht, Schweißnahtmorphologie und mechanischen Eigenschaften offen.

Grundsätzlich gilt, dass alle thermoplastischen Kunststoffe außer PTFE sich gut mit dem Ultraschallschweißverfahren untereinander kombinieren lassen. Dabei spielen bei der Schweißbarkeit viele Faktoren eine entscheidende Rolle. An erster Stelle kommt das E-

Modul, das für die Überführung der Schallleitung und somit die Auslegung der notwendigen Amplitude unerlässlich ist. Materialien mit niedrigerem E-Modul beziehungsweise Speichermodul wie Elastomere, PP oder PE zeichnen sich durch niedrige Energieübertragung während des Schweißprozesses aus. Bei diesen sollte beim Prozessentwurf der Abstand zwischen Sonotrode und Fügezone minimiert werden. Für den optimalen Wärmebedarf müssen der Schmelzpunkt und die Materialdämpfung betrachtet werden. Dies kann auch die Fließfähigkeit der Schmelze und deren Gestaltung in der Fügezone beeinflussen. In der Regel ist meistens schwer ein Werkstoff zu finden mit gleichzeitig guter Energieübertragungs- und Dissipationsfähigkeit [Gre03, NN14⁺].

Mit dem steigenden Wachstum der Industrie hat sich das Einsatzspektrum von verstärkten Kunststoffen erweitert. Diese neu entwickelten Werkstoffe brachten viele Herausforderungen bezüglich der Fügemöglichkeiten. Forscher bemühen sich seit Jahrzehnten herkömmliche oder moderne Schweißverfahren für diese Werkstoffe anzuwenden [Ben87, Liu02, Nes03, You04, Vil10, Vil12, Lev12, Har13, Abd14]. Der Begriff „composite“ oder „Verbundwerkstoff“ ist basierend auf der Entwicklung einer Materialkombination von unterschiedlichen Materialien, um ein einziges Material zu erhalten, das eine bessere Eigenschaft als jedes der ursprünglichen Bestandteile aufweist.

Um eine Vielzahl von mechanischen Eigenschaften und Gebrauchstemperaturen abzudecken, werden heutige Verbundmaterialien durch den Einsatz von verschiedenen Matrizen einschließlich Polymeren (Polymer Matrix Composites), Metallen und Keramik sowie ein breites Spektrum von Verstärkungen aus Polymeren, Kohlenstofffaser, Glas, Metall oder Keramik hergestellt. Die einzigartigen Vorteile von Verbundwerkstoffen verglichen mit monolithischen Materialien wie Metallen oder Legierungen umfassen höhere spezifische Festigkeiten und Steifigkeiten sowie die Fähigkeit, die Steifigkeit und Festigkeit anzupassen, um den gewünschten Anwendungen gerecht zu werden [Kel94, Age02].

In Bezug auf die Ultraschallschweißbarkeit könnten Füllstoffe wie z.B. Glas den gesamten Prozess von Kunststoffen stark beeinflussen. Erfahrungsgemäß wurde festgestellt, dass sich beim Zufügen einer Menge bis 10 Gew.-% Kurzglasfaser mit PP oder PE die innere Energieübertragung und somit die Schweißbarkeit verbessern [Gre03]. Die Energieübertragung ist eine entscheidende Größe bei der Betrachtung der Schweißbarkeit von Kunststoffen. Sie ist direkt abhängig von dem Speichermodul und beschreibt wie schnell das Material Schall überträgt kann. Werkstoffe mit niedrigem Speichermodul wie Elastomere sind ohne konstruktive Maßnahme schlecht schweißbar. Beim Erhöhen der Füllermenge um 15 Gew.-% würde sich hingegen die Schweißbarkeit eher verschlechtern. Diese Erscheinung

tritt auf infolge des mechanischen Druckes, die die ausgequetschten Schmelze auf die Faser ausübt. Dadurch kommt es zur unerwünschten neuen Orientierung und somit zur Verdichtung der Fasern in der Fügezone [Gre03].

	ABS	ABS/PC	LCP	PA	PBT	PC	PC/PBT	PE	PEEK	PEI	PET	PMMA	POM	PP	PPO	PPS	PS	PVC	SAN
ABS																			
ABS/PC																			
LCP																			
PA																			
PBT																			
PC																			
PC/PBT																			
PE																			
PEEK																			
PEI																			
PET																			
PMMA																			
POM																			
PP																			
PPO																			
PPS																			
PS																			
PVC																			
SAN																			

schweisssbar

Schweisssbarkeit abhängig von Materialzusammensetzung

Tabelle 3.1: Ultraschall-Schweißbarkeit Kompatibilitätstabelle für Thermoplaste [Zie00; Duk11]

3.6.2. Metall / Metall-Verbund

Der Metall/Metall-Verbund gewinnt aufgrund steigender Anforderungen der Industrie sowie der Suche nach neuen Werkstoffkombination größere Bedeutung.

Seit den 50er Jahren wurde das Verfahren (Abbildung 3.2) zum Fügen metallischer Partner mit einer Koppelfläche von 100 mm² verwendet [Kuc03]. Bei der Untersuchung der Schweißbarkeit von Metallen oder metallhaltigen Hybridbauteilen ist es notwendig, die

Gitterstruktur sowie ihre physikalischen Eigenschaften wie Härte oder E-Modul zu betrachten. Wodara [Wod86] hat bei seinen Untersuchungen beobachtet, dass die Schweißneigung mit zunehmender Härte abnimmt. Die Härte sollte zwischen den Schweißneigungsgruppen eine Differenz von 1000 HV nicht überschreiten. Metalle wie Aluminium, Kupfer, Gold, Silber, Nickel, Palladium und Platin besitzen eine kubisch-flächenzentrierte Gitterstruktur. Deshalb sind sie sehr gut mit Ultraschall schweißbar. Andere Metalle, die einen hexagonalen Gitteraufbau haben, wie Magnesium, Titan oder Zink sind nur bedingt schweißbar.

	V	Zr+Leg.	U	W+Leg.	Nb+Leg.	Ti+Leg.	Sn	Ta+Leg.	Ag+Leg.	Si	Pt+Leg.	Pd+Leg.	Ni+Leg.	Mo+Leg.	Mg+Leg.	Stahl, Eisen	Au	Ge	Cu, Ms	Be+Leg.	Al+Leg.
Al+Leg.																					
Be+Leg.																					
Cu, Ms																					
Ge																					
Au																					
Stahl, Eisen																					
Mg+Leg.																					
Mo+Leg.																					
Ni+Leg.																					
Pd+Leg.																					
Pt+Leg.																					
Si																					
Ag+Leg.																					
Ta+Leg.																					
Sn																					
Ti+Leg.																					
Nb+Leg.																					
W+Leg.																					
U																					
Zr+Leg.																					
V																					

Schweißgeeignet
 nicht bekannt , nicht untersucht

Tabelle 3.2: Ultraschallschweißbarkeit-Kompatibilitätstabelle für Metalle [Sch98, Bor04]

Die Schweißbarkeit solcher Werkstoffe kann durch zusätzliche Faktoren wie Vorwärmung, Einlegen artfremder Folien zwischen den Fügepartnern oder Schweißen von metallbeschichteten Teilen geändert werden. Viele solcher Mischverbindungen stellen

Herausforderungen an die Oberflächengüte sowie die thermische Beanspruchung der Sonotrodenarbeitsfläche [Wod86, Gre03+, Bor04].

In Tabelle 3.2 werden laut bisherigem Stand der Technik schweißgeeignete Metallkombinationen dargestellt. Weiterführend wurden die technischen Anwendungen solcher Verbindungen zum Beispiel durch Anschweißen von Kupferlitzen oder Flachleiterkabel untersucht [Her00, Gre03⁺]. In der Literatur sind diverse Simulations- und Festigkeitsuntersuchungen zum Ultraschallschweißen von Metallen sowie Metallschäumen unter Bezug mechanisch-technologischer Faktoren zu finden [Ada95, Vri04, Cal13].

3.6.3. Keramik / Metall-Verbundwerkstoffe

Diese Hybridverbindung wurde unter Variation der Keramik- und metallischen Komponenten intensiv erforscht. Zum Einsatz kamen Untersuchungen zum Verbinden von Keramiken wie SiC, Si₃N₄ und ZrO₂ mit Magnesium, Kupfer und Aluminium. Bei diesen Versuchen wurde eine duktile Zwischenlage aus Aluminium zwischen den beiden Fügepartnern eingesetzt [Gre97, Kuc03, Gre03⁺]. Dieser Einsatz wurde bereits 1968 von Stemmer [Ste68] beim Ultraschallschweißen von Glas und Kupfer unter Anwendung 0,1 mm dicker Aluminiumfolie berichtet. Wagner [Wag97⁺] hat nach diesem Prinzip diverse Untersuchungen zum Ultraschallschweißen von NiCo2917 und X5CrNi1810 mit Keramiken durchgeführt. Bei der Auswertung durch Zugscherfestigkeit schwanken die Werte zwischen 63 und 78 MPa. Der höchste Wert wurde bei der Verbindung NiCo2917/Al/Si₃N₄ erreicht.

Zwischen 1973 und 1988 wurden aufgrund des instabilen Schweißverhaltens von Keramik sowie der schwierig reproduzierbaren Ultraschallschweißverbindung die Forschungsarbeiten mit Keramik als Fügepartner nicht mehr vorangetrieben [Wag97⁺]. Zuckschwerdt [Zuc99] hat den Einfluss verschiedener Beschichtungen wie zum Beispiel durch PVD und Plasmaspritzen auf die Festigkeit von ultraschallgeschweißten Oxidkeramik-Kupfer-Verbunden untersucht. Dazu hat er einen erhöhten Schweißleistungsverlauf durch Plasmareinigung der Keramik in der Fügefläche beobachtet. Bei der späteren Untersuchung insbesondere in Japan wurde auf Einsatz der Zwischenlage verzichtet. Imai [Ima06] hat in seinen Untersuchungen die Festigkeit der Schweißverbindung verschiedener Metalle und Keramiken dargestellt. Er konnte zum Beispiel eine zugfestgerechte Ti/ZrO₂-, Ti/Si₃N₄-, Ti/SiC- sowie Cu/SiC- und Cu/Si₃N₄-Verbindung herstellen.

3.6.4. Metall / glasfaserverstärkte Verbundwerkstoffe

Die Verbindungsmöglichkeit von Metallen und Glasfasern mittels Ultraschallschweißens wurde durch zahlreiche Veröffentlichungen untersucht. Die Herstellungsverfahren solcher Verbunde verdrängten herkömmliche Verfahren, bei denen Kleben oder Löten zur Anwendung kam [Eif96]. Während des Bindungsprozesses war die Hauptvermutung, dass die chemische Oxidreaktion in der Grenzfläche zur Schweißung führt [Wag97⁺].

Stemmer [Ste68] berichtete, ähnlich wie bei dem Metall-Keramik-Verbund, von dem erfolgreichen Einsatz einer Aluminium-Zwischenlage zur Vermeidung der Bruchgefahr beim Glas, die durch ungleichmäßige Kraftverteilung in der Fügezone verursacht wird. Die Auswertung ergab eine starke Verbundfestigkeit bei Al-Glas und Cu-Glas. Bei diesen Untersuchungen wurden aber keine Angaben zur Schweißkraft, -amplitude und -zeit genannt [Wag97].

Durch Reuter [Reu92] ist die Schweißbarkeit von Reinaluminium Al99,5 mit Silikatglas und Glaskeramik zum ersten Mal realisiert worden. Dabei wurde die Korrelation zwischen Maschinenparametern und Schweißergebnissen ermittelt.

Eifler [Eif96] und Schlicker [Sch97] haben vergleichende Untersuchungen zum Schweißen von der Al-Legierung AlMg3 und hochlegiertem Stahl der Zusammensetzung X6-CrNiMoTi1712 mit Borosilikat- und Soda-Lime-Silica-Glas mittels Punkt- und Rollnahtschweißen gemacht. Die Ergebnisse der Zugscherfestigkeit waren zwischen 5 und 16 MPa. Weitere Untersuchungen in diesem Zusammenhang unter Berücksichtigung der thermischen Eigenspannung sind in [Sch98] dargestellt. Krüger [Krü05] hat den Bindungsmechanismus von Metallen mit Polymermatrixwerkstoffen und Glasfasertextilien unter Verwendung einer Al-Zwischenlage mittels punktuellen Metall- und Kunststoffultraschallschweißens sowie Torsionsultraschallschweißens untersucht.

3.6.5. Metall / kohlenfaserverstärkte Verbundwerkstoffe

Da diese Arbeit die Ultraschallschweißbarkeit von graphithaltigen Werkstoffen behandelt, wird zunächst näher auf die wichtigsten, bisher bekannten Untersuchungen, bei denen sich dieses Fügeverfahren mit Graphit beziehungsweise Kohlenstoff überlappt, beschrieben.

Krause [Kra77] zeigte im Rahmen seiner Dissertation die Bindungstetraeder der bekannten chemischen Bindungsarten mit Darstellung der von ihm untersuchten Nichtmetalle (Abbildung 3.10). Er erwähnte, dass diese Bindungen nie in der Realität alleine auftreten, sondern führend sind gegenüber anderen Bindungsarten. Die „Van-der-Waals-Bindung“ stellt

die schwächste Wechselwirkung im Vergleich zu den anderen Bindungsarten dar. Nunmehr bezeichnete er Graphit als Werkstoff mit Schichtstruktur. In diesem Fall wird bei Begegnung zwei Bindungsarten nur die schwächste als ausgeprägt betrachtet. Darum hat er vermutet, dass sich in dieser schwachgebundenen Ebene die Bruch- beziehungsweise die Schweißebene befindet. Aus diesem Grund liegt Graphit in der Nähe von der „Van-der-Waals-Bindung“.

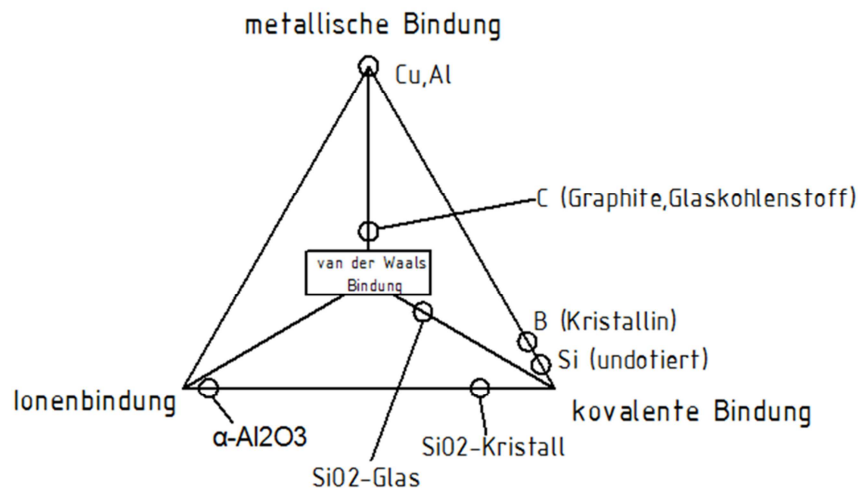


Abbildung 3.10: Ultraschallschweißbarkeit-Kompatibilitätstabelle für Thermoplaste [Kra77, Wag97]

Einige Patente aus den USA stellten erste Untersuchungen hinsichtlich der Herstellung von Graphit-Metall-Verbundan. Goddard [Godd72] hat verschiedene Fügeverfahren für Aluminium-Graphit-Verbundwerkstoffe erprobt, wobei festgestellt wurde, dass das Ofenlöten am geeignetsten ist. Schwartz [Sch82] beschreibt in seinem Patent eine Methode zum Verbinden von zwei Metallsammelschienen mit dazwischen aufgesteckten Graphitelektroden mittels Widerstandpunktschweißens der metallischen Fügepartner zur Anwendung bei elektrochemischen Zellen.

Turpin [Tur02, Tur04] hat das Ultraschallschweißen als Möglichkeit benannt, um zwei Bipolarplatten mit elektrisch leitfähigen Teilchen miteinander zu verbinden. Er hat Graphit beziehungsweise Kohlenstofffaser als mögliche Füllstoffe benannt. Mehler [Meh04] hat ebenfalls in seiner Patentschrift erwähnt, dass die Abdichtung von graphithaltigen Bipolarplatten in PEM-Brennstoffzellen durch Verschweißen der Platten untereinander mit Ultraschallschweißen realisiert werden kann. Brokamp [Bro10] hat Ultraschall als Lösung zur Anstoßung einer Relativbewegung zur Hitzebildung bei der Herstellung eines Formteils aus wenigstens zwei Teilelementen, die aus einem Verbund mit Graphit als Füllstoff bestehen, benannt. Masaki [Mas14] hat das Verbinden von zwei oder mehr kohlenfaserverstärkten Kunststoffen mit Harz als Matrix durch Erwärmen eines Verbundabschnitts und anschließend mit dem zweiten Teil durch Ultraschallschweißen untersucht.

All diese Patente enthalten unzureichende oder gar keine Angaben zur chemischen Zusammensetzung beziehungsweise zum Graphitanteil im Verbund, zu den verwendeten Maschinenparametern, zur Sonotrodengeometrie, zum Bindungsmechanismus und zu Festigkeitswerten.

Syassen [Sya14] hat das Ultraschallschweißen von Titan und Titanlegierungen mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen zum Beispiel Polyetheretherketon, CF-PEEK, oder kohlefaserverstärkten Polyphenylensulfid, CF-PPS, patentiert. In seiner Patentschrift wurden ebenfalls keine Aussagen zu verwendeten Schweißparametern gemacht.

Die Untersuchungen von Benatar zwischen 1986 und 1989 [Ben87, Ben89⁺] waren grundlegend für das Ultraschallschweißen graphithaltiger PEEK/AS4-APC-2 Verbundstrukturen mit ERG. Dabei stellt er eine Modellbildung der hauptphysikalischen Prozesse (Oberflächenbehandlung, Heizen, Pressen, Diffusion und Kühlung) auf und koppelt diese anschließend zusammen während der gesamten Prozesssimulation.

Harras [Har96] hat die Schweißparameter beim Schweißen von PEEK-APC-2 – insbesondere den Schweißdruck – und die Energie sowie Schweißzeit zur Verbesserung der Festigkeit optimiert. Er stellte fest, dass der optimale Schweißdruck bei 3,8 MPa und die Schweißenergie bei 6,8 J/mm² liegt und die Schweißenergie ein besserer Steuerparameter als die Schweißzeit ist.

Die Veröffentlichung von Sancaktar [San04] beschäftigt sich mit dem Einfluss von verschiedenen Füllstoffen wie Talkum, Calciumcarbonat, Glasfasern etc. auf die Schweißnahtfestigkeit von mit 10-40 Gew.-% gefüllten spritzgegossenen Polypropylenen. Ziel war die Schweißparameter und die Füllmenge zu variieren, um die Festigkeit zu erhöhen vergleichend mit ungefüllten Polypropylenen.

Villegas [Vil12] hat vergleichende Untersuchungen zum Ultraschall-, Vibrations- und Induktionsschweißen von kohlenstoffverstärktem Polyphenylensulfid (PPS) durchgeführt. Durch Ultraschall konnte 100.-%-iges Fügen erfolgen. Die Scherzugfestigkeit von Ultraschall- und Induktionsschweißen lag bei ca. 27 MPa.

Villegas [Vil13] untersuchte auch die Ultraschallschweißbarkeit von kohlenstoffverstärkten Polyetherimid sowie die Heizmechanismen in der Fügezone und deren Abhängigkeit von der Verlustleistung und Verschiebung der Sonotrode.

Balle [Bal07, Bal08, Bal13] hat das Ultraschallschweißen zum ersten Mal innovativ zum Verbinden von Metallen wie die Aluminiumlegierungen Al99,5 und AlMg3 sowie walzplattierten Karosseriestahl mit Kohlenstofffaser-Gelege und -Gewebe eingesetzt.

Bei Herstellung von Metall/CFK-Verbunden [Bal09] wurden Metall- und Kunststoffultraschallschweißen gegenübergestellt. Die Verbundfestigkeit, durchgeführt mit Metallultraschallschweißen, war um 100 % besser. Ferner wurde festgestellt, dass die Oberflächenbehandlung von AlMg3 die Verbundfestigkeit um 54 MPa erhöht. Weitere Untersuchungen zum Ultraschallschweißen mit kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen sind in [Rom11] dargestellt. Schauermann [Sch15] hat einen Beitrag zum Ultraschallschweißen von Kohlenstoffnanoröhren (mit Kaliumtetrabromidoaurat(III) dotiert) mit einer Kupferplatte erstellt. Er hat festgestellt, dass die Verbindung einen geringen spezifischen elektrischen Widerstand von bis $4,3 \Omega \text{ cm}^2/\text{m}$ aufweist.

3.7. Einsatz der Vorwärmung beim Ultraschallschweißen

Die bisherigen Untersuchungen zum Einsatz von Ultraschallschweißverfahren zeigen, dass das Forschungspotenzial dieses Verfahrens sowohl im Bereich der Thermoplaste als auch der Hybridbauteile noch lange nicht ausgeschöpft ist. Doch der zunehmende Einsatz des Ultraschallschweißens zum Fügen von neuen Materialien mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften, stellt neue Herausforderungen an den Schweißprozess. Insbesondere im Bereich kohlenstoffhaltiger Kunststoffe reichen in vielen Fällen die Schweißparameter nicht mehr, um die notwendige Wärme zu erzeugen und somit das Material in den Schmelzvorgang zu bringen. Aus diesem Grund stellt die Vorwärmung der Fügepartner, vor und während des Schweißprozesses, einen innovativen Einsatz zum erfolgreichen US-Schweißen dar.

Die in dieser Arbeit hergestellten Verbunde basieren auf dem Einsatz der Vorwärmung als Hauptfaktor während des Schweißvorganges. Es wurden wenige Veröffentlichungen gefunden, die die Vorwärmung beim Ultraschallschweißen betrachten. Bisher bekannte Formen dieses Ansatzes wurden entweder durch Infrarot-Strahlung oder Aufheizung des Ambosses umgesetzt, da die Aufheizung der Sonotrode aus schwingungstechnischen Gründen bisher unrealisierbar ist.

Khryakova [Khr00] hat die IR-Vorwärmung beim Ultraschallstumpfschweißen von Polyamid eingesetzt. Dadurch konnte die Verbundfestigkeit um 86% erhöht werden.

Potente [Pot04⁺] hat beim Vibrationsschweißen die IR-Vorwärmung der Fügeflächen durch Heizstrahler realisiert, um die Abriebentstehung zu reduzieren. Er hat beobachtet, dass eine beidseitige Vorwärmung der Fügeflächen die Abriebmenge besser reduziert als einseitiges,

Durch diesen Einsatz konnte eine Schweißnahtfestigkeitssteigerung bei Polypropylen erzielt werden. Detaillierte Werte zur Festigkeit wurden nicht erwähnt.

Kuriykov [Kur04] hat ebenfalls die IR-Vorwärmung erfolgreich beim Vibrationsschweißen von Thermoplasten eingesetzt. Diese dient als Maßnahme zur Reduzierung der Entstehungsmechanismen von Reibartikeln und Fusseln, bedingt durch Feststoffreibung. Vor Beginn des Schweißvorganges werden die glasfaserverstärkten Materials durch IR-Strahler erwärmt. Die Herstellung fusselfrei Schweißverbindung wurde erreicht. Die Berstdruckfestigkeit zeigte eine Verbesserung von ca. 67%.

Imai [Ima06] hat in seinen erwähnten Untersuchungen zur direkten Ultraschallschweißung von Metal/Keramik dargestellt, dass sich bei Vorwärmung die Schweißfähigkeit der Keramik durch Erwärmung des Ambosses verbessert (von 50 auf 60 MPa). Gleichzeitig wird die Schweißzeit und der Schweißdruck reduziert.

Micaheli [Mic11] hat ebenfalls die IR-Vorwärmung zur Vermeidung der Fusselbildung in der Fügezone beim Schweißen von PC und POM eingesetzt. Dies führte zu verbesserten Schweißnahtgestaltungen und genauso wie bei Potente zur Schweißnahtfestigkeitssteigerung. Die aufgestellten Vergleichswerte zeigten eine Verbesserung der Bruchkräfte durch Vorwärmung zwischen 53% und 110%.

Sooriyamoorthy [Soo12] hat die Grenzflächen-Temperaturverteilung zu Optimierung des Ultraschallschweißvorganges von Aluminium/Keramik-Verbund ebenfalls unter Betrachtung der Vorwärmung von Keramik beurteilt. Bei der Untersuchungen von Flock [Flo11] wurde klar, dass eine stoffschlüssige Verbindung von Metall-Kunststoff-Verbindung aufgrund der weit unterschiedlichen Schmelzpunkte nicht ohne Vorbehandlung der metallischen Fügepartner möglich ist. Diese geschieht in Form von Flammgespritzungen als Haftvermittlerschichten und durch Vorwärmung des Metalls auf 180°C.

4. Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

4.1. Eingesetzte Ultraschallschweißanlage

Die durchgeführten Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden mit einer traditionellen Kunststoffultraschallschweißanlage vom Typ USV 2500 S Baujahr 1993 von der Firma Herfuth-Hamburg ausgeführt (Abbildung 4.1). Die pneumatische Bedienung erfolgte mit der Mikroprozessorsteuerung COSONIC H68KS. Der Booster hat ein Übersetzungsverhältnis von 1:2 mit eingemessener Ausgangsamplitude von $\lambda/2 = 5 \mu\text{m}$. Der Ultraschall-Generator USG 2402 wandelt die niederfrequente elektrische Energie des Wechselstroms nach zwischenphasiger Gleichrichtung in hochfrequente Energie des Ultraschallbereiches um. Dadurch kann eine Leistung von 2400 W an den Wandler abgegeben werden. Er besitzt eine automatisierte Leistungs- und Frequenzregelung zur Anpassung seiner Frequenz an die mechanische Resonanzfrequenz der Schweißeinheit. Die Zeitsteuerung kann elektronisch im Bereich von 0,05 bis 9,99 s eingestellt werden. Die Kühlung erfolgt mittels Axial-Lüfter [NN93].

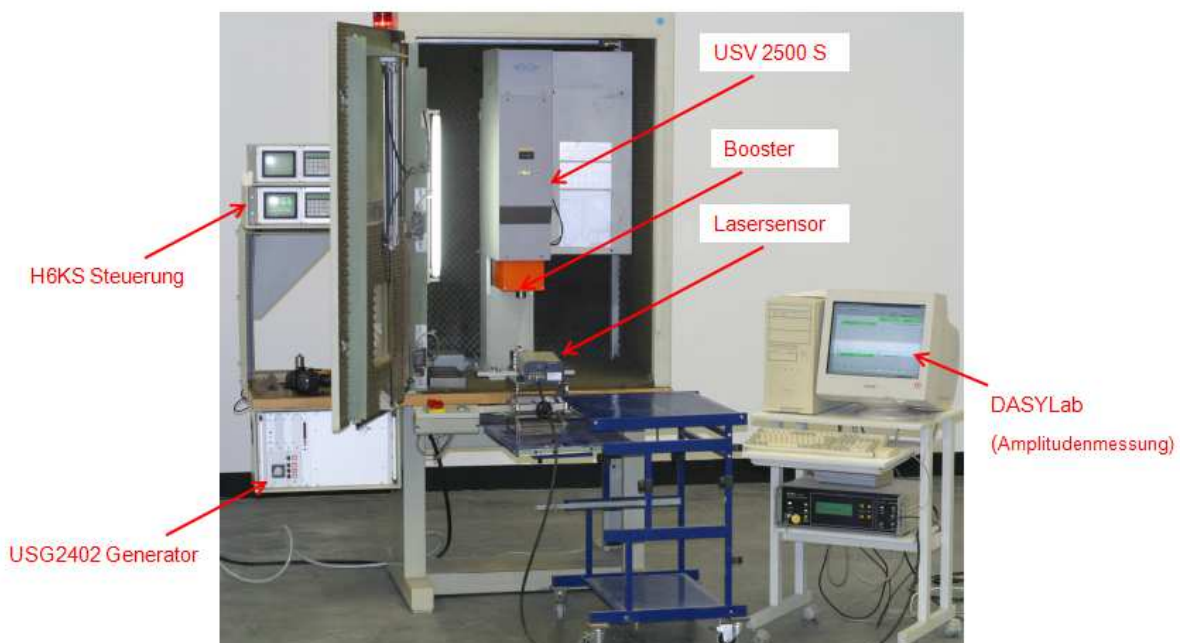


Abbildung 4.1: Ultraschallschweißanlage USV 2500 C von Herfurth mit Proben-Fixiervorrichtung

Die extra installierte elektronische Überlastssicherung schützt die Generatorelemente vor ausgangsseitiger Überlastung sowie starker Fehlanpassung.

Auskoppel- und Frequenzregelschaltung tragen zur Erhaltung des Wirkungsgrades des Ultraschallwandlers, bei stark schwankenden Lastsituationen, bei. Die Steuerstufenspeisung geschieht durch ein stabilisierendes Kleinspannungsnetzteil, ausgestattet mit Transistoren und

Schaltkreisen. Die Endstufenspeisung ereignet sich direkt über die am Netz bestehende Gleichrichterschaltung. Diese Endstufe funktioniert als Schwingkreis-Wechselrichter mit integrierten Thyristoren als aktive Elemente. Die Anlage ist mit einem Ultraschallkopf 1000/20-20 kHz Arbeitsfrequenz, zur Wandlung der elektrischen Schwingungen des Generators in mechanische ausgestattet. Dieser besitzt eine Eingangsleistung von 2400 W und piezoelektrische Schwinger aus Keramik [NN93].

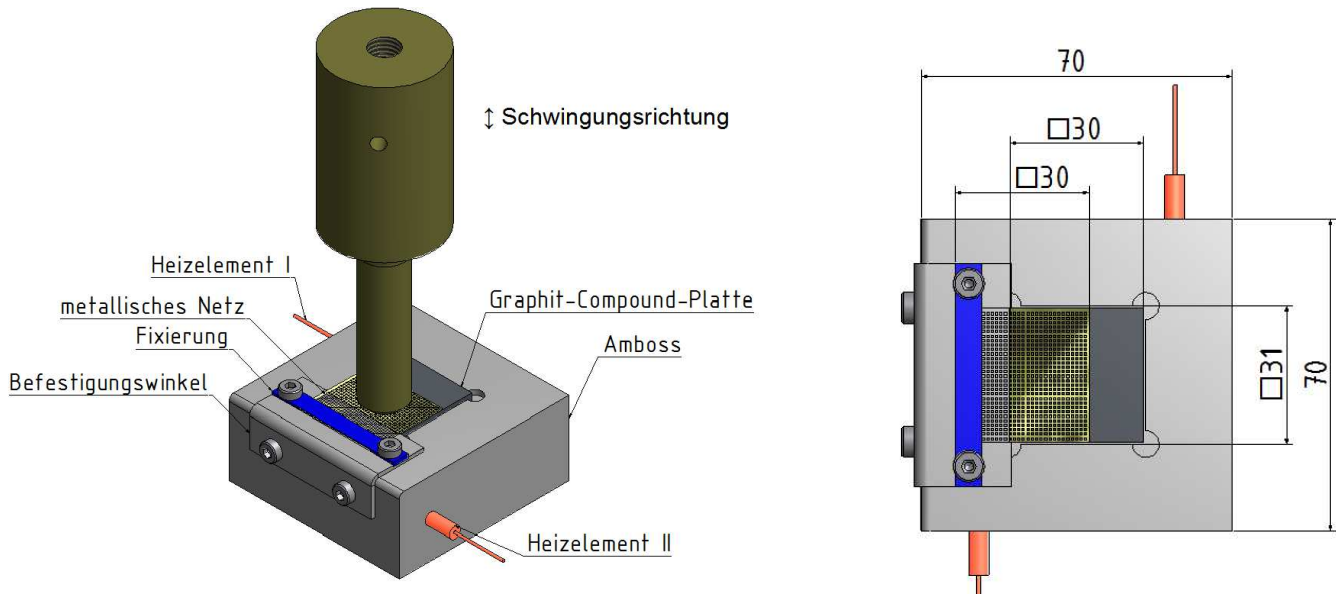


Abbildung 4.2: Schweißaufbau (schematisch)

Die COSONIC-H68KS-Steuerung ermöglicht die digitale Eingabe der Schweißparameter sowie die Aufzeichnung der Schweißkurve und die Protokollierung der Ergebnisse. Es ist möglich, den Schweißprozess per Zeitsteuerung oder Energieregung „Weg-absolut“ oder „Weg-differenziell“ zu freien Wahl der Triggerkraft zu steuern. Dazu besteht die Möglichkeit, den gesamten Prozess gleichzeitig auf Soll-Zeit, Soll-Energie oder auf Kurvenverlauf zu überwachen [NN93⁺]. Da die Überwachungsart keinen Einfluss auf die Schweißnahtfestigkeit oder Zykluszeit hatte, wurde bei den gesamten Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit eine Energieüberwachung ausgewählt. In Abbildung 4.2 ist der Schweißaufbau dargestellt. Die einzige externe Modifizierung auf dem Schweißprozess war der Einsatz von 2 x 24-V/60-W-Heizelementen (Ø 4,5 mm x 40 mm) im Amboss zur Herstellung der Probenerwärmung während des Schweißprozesses.

Dafür wurde ein Regelkreis für den Amboss installiert. Dieser besteht aus einer 24-V-Spannungsquelle, einem Temperaturregler vom Typ TD05N der Firma Heraeus. Damit kann die Aufheiztemperatur durch Heizelemente vorgegeben und mit der durch ein Thermoelement

(hier: GF 130, Typ K von der Firma Greisinger electronic) gemessenen Ist-Temperatur verglichen werden.

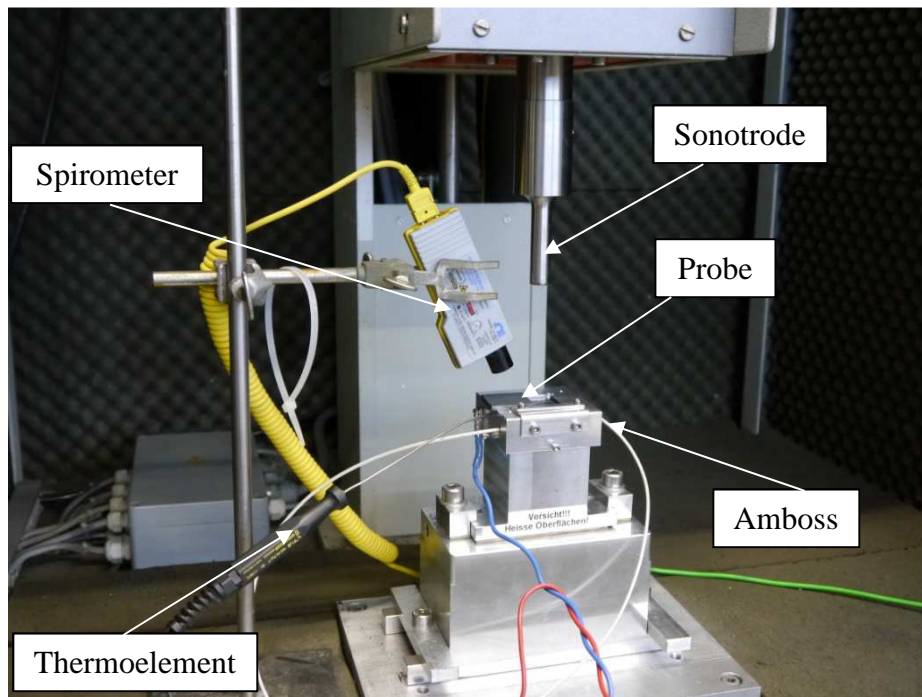


Abbildung 4.3: Schweißaufbau (real)

In Abbildung 4.3 ist der reale Untersuchungsaufbau an der Ultraschallanlage dargestellt. Neben der externen Aufheizung des Ambosses wurde eine Temperaturmesseinrichtung zur Messung der Probentemperatur an der Schweißzone vor und nach der Schweißung aufgebaut. Diese besteht aus einem Spirometer vom Typ OSM 100 der Firma Omega Engineering USA mit einem digitalen Temperaturanzeiger vom Typ VOLTcraft 306. Dadurch wird nach Änderung der Amboss-Temperatur eine genaue Beobachtung des Aufheizprozesses in der graphithaltigen Platte erreicht.

4.2. Versuchswerkstoffe

4.2.1. Graphit-Compound-Werkstoffe

Graphit entsteht durch eine stabile Modulation des reinen Kohlenstoffs und kristallisiert in einer hexagonalen ebenen Kristallgitterstruktur und weist gute anisotrope Eigenschaften auf [Kre08]. Reine Graphitplatten sind günstig und haben eine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit und eine geringe Dichte, sind aber sehr spröde und somit schwer bearbeitbar. Darum bieten solche Compounds eine gute Möglichkeit, um ein Material herzustellen, das die Eigenschaften von Graphit als anorganischer Füllstoff demonstriert und gut verarbeitbar ist.

Die Herstellung von PPG86 und BMA5 begann bei der SGL Technologies GmbH und wurde ab 2006 von der Firma Eisenhuth übernommen und weiterentwickelt [Wei09]. Es wurden einige Ergebnisse zu Untersuchungen mit diesem spezifischen Materialien veröffentlicht. Müller [Mül06] hat die Spritzgießverfahren zur Herstellung von Bipolarplatten aus PPG86 dargestellt. Dazu wurden das Elastizitätsmodul und die Biegefestigkeit sowie die Produktionskosten ermittelt.

Müller [Mül03] hat in seinem Projekt eine PEM-Brennstoffzelle inklusive BBP entwickelt. Dabei wurden diverse grundlegende Untersuchungen zur Entstehung neuer Graphit-Compounds durchgeführt. Er stellte sich schnell heraus, dass BMA5 im Gegenteil zu PPG86 nicht zum Spritzgießen geeignet ist. Anschließend wurden die Compounds wirtschaftlich als auch rheologisch charakterisiert und in einem Stack eingesetzt. Die neue Entwicklung wurde unter Patentnummer DE 102 16 306 angemeldet.

Die Veröffentlichungen von Stübler und Hickmann [Stü12, Hick13, Stü14] beschäftigten sich mit dem Einfluss der Polymermatrix auf die thermischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften auf verschiedene Compounds unter anderem mit PP und PVDF als Binder. Darin wurden die Handelsnamen (BMA5 und PPG86) explizit dargestellt.

Die Hauptaufgabe der Bindemittel ist eine kostengünstige spanende Verarbeitung des Graphit-Compounds zu ermöglichen und die mechanische Energie in der Platte zu absorbieren sowie die Gefahr der Rissbildung zu minimieren. Die kostengünstigeren duroplastischen Binder können einer Einsatztemperatur bis 200 °C widerstehen und besitzen eine höhere Warmformbeständigkeit und die Möglichkeit zur Wiedergewinnung (Recycling) gegenüber Thermoplasten. Als Stand der Technik werden hochgefüllte Compounds mittels Heißpress- und Spritzgießverfahren hergestellt. Das Heißpressverfahren wird hauptsächlich bei duroplastischen Bindern mit minimaler Wandstärke ≥ 1 mm eingesetzt. Es ist kostengünstiger im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung und ermöglicht die

Fertigung sowohl strukturierter als auch unstrukturierter Platten. Die Fertigung verläuft nach Vorgaben des Kunden Mithilfe der für die Herstellung notwendigen Fertigungsparameter wie Aushärtezeit und Verdichtungsdruck. Der Herstellprozess beginnt mit der Dosierung der zu verpressenden Compounds, die auf die Plattengeometrie und Heißpresspartikel abgestimmt werden müssen mit anschließendem Abfüllen in das offene, temperierte Presswerkzeug. Im Falle duroplastischer Binder muss die Platte, bevor sie aus dem Hohlraum des Werkzeuges entnommen wird, schon ausgehärtet sein. Bei Thermoplasten hingegen muss zunächst die Aufschmelzphase des Compounds stattfinden. Danach wird unter der Schmelztemperatur beziehungsweise der Glasübergangstemperatur entformt. Vorteile verspricht dieses Verfahren durch die Möglichkeit, feine Kanalstrukturen bei Bipolarplatte direkt in das Presswerkzeug einzubringen und somit eine spätere spanende Bearbeitung (in diesem Fall Fräsen) zu ersparen. Nachteilig bei Duroplasten ist die lange Aushärtezeit und die nicht realisierbare Einbringung von Gasführungslochern für die Bipolarplatte [Nie05, Kre08, Hic15⁺].

Das Spritzgießverfahren hingegen wird bei höherem Binderanteil eingesetzt. Es verspricht als formgebendes Verarbeitungsverfahren, im Vergleich zum Heißpressen, mehrere Vorteile, insbesondere in der Großserienfertigung, wie z.B. kurzen Taktzeiten, hohe Reproduzierbarkeit und Abbildungsgenauigkeit der komplexen Strukturen. Die polymerartigen standardmäßig in Form von Pellet werden aus dem Anlagentrichter gezogen [Kre08, Yee10].

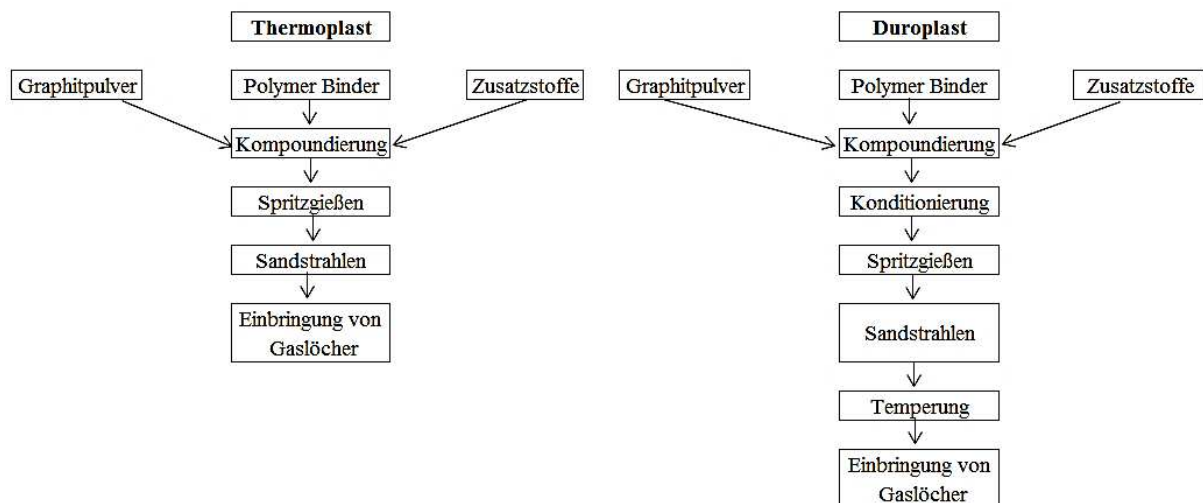


Abbildung 4.4: Produktionsprozessablauf beim Spritzgießen von Graphit-Compounds mit thermoplastischen und duroplastischen Bindern [Mül04]

Mit diesem Schritt beginnt die Vorkonditionierungsphase, das heißt, die Pellets werden in der Plastifizierschnecke aufgeschmolzen und in die Spritzgießanlage überführt mit anschließender Aufdosierung. Durch die axiale Hubbewegung der Plastifizierschnecke schließt sich das Rückstromventil und es kann Kunststoffschmelze unter hohem Druck in den Werkzeughohlraum (Kavität) eingespritzt werden, wo die Erstarrung der Masse durch

temperierte Werkzeuge zum Spritzgießteil stattfindet. Danach wird das Formteil durch einen Schieber ausgeworfen [Kre08]. Die entstehende Schrumpfung des Kunststoff kann durch Temperatúrausgleich der Kavität und vordefinierten Nachdruck nicht behoben werden. In Bezug auf Spritzgießen von Graphit-Compounds müssen aufgrund des hohen Graphitanteils sowie der Morphologie und physikalischen Eigenschaften einige Faktoren in Betracht genommen werden. Vor allem die erhöhte Viskosität der graphithaltigen Schmelze erfordert höhere Pressdrücke, eine Einschränkung der Graphitpartikelgröße und Einspritzleistungen sowie eine knappe Dimensionierung des Fließweges in Abhängigkeit von der Wanddicke. Dadurch kommt es zu einem hohen Abscherungsgrad, zum Bruch der Graphitpartikel und zur Änderung der Querschnittverhältnisse sowie zu Reduzierung der elektrischen Leitfähigkeit spritzgegoßener Compounds [Ant11]. Ebenfalls unterscheidet sich das Spritzgießverfahren mit thermoplastischen und duroplastischen Bindemitteln (Abbildung 4.4). Duroplaste erfordern zusätzliche Konditionierungsprozessschritte und ermöglichen wie in Heißpressverfahren keine vollständige Einbringung der Gasführungslöcher im Spritzgießprozess [Kre08, Özt12, Hic15⁺].

Für diese Untersuchungen wurden neben metallischen Werkstoffen ausschließlich hochgefüllte Graphit-Compounds als zweite Fügepartner gewählt (Tabelle 4.1). Die Mehrheit der Untersuchungen wurde mit PPG86- und BMA5-Compounds - hergestellt bei der Firma Eisenhuth GmbH & Co. KG in Osterrode - durchgeführt.

Bezeichnung	Hersteller
PPG86 (SIGRACET® BPP)	Eisenhuth GmbH & Co. KG
BMA5 (SIGRACET® BPP)	Eisenhuth GmbH & Co. KG
TECACOMP® PP HTE	Ensinger GmbH

Tabelle 4.1: Verwendete hochgefüllte Graphit-Compounds

Die BMA5 und PPG86-Platten werden mittels Heißpressens, TECACOMP mittels Spritzgießens hergestellt und enthalten jeweils 86 Gew.-% und 85 Gew.-% synthetischen Graphit. Als thermoplastisches Bindemittel bei PPG86 wurde Polypropylen, bei BMA5 hingegen Polyvinylidenfluorid eingesetzt [Hic15]. Der TECACOMP-Werkstoff enthält 80 Gew.-% synthetischen Graphit und 20 Gew.-% Polypropylen und wird ebenfalls wie PPG86

mittels Spritzgießverfahrens hergestellt [Kre08, Stu15]. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften aller graphithaltigen Materialien sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

		PPG86	BMA5	TECACOMP® PP HTE
Dichte	g/cm ³	1,85	2,1	0,83
Biegefestigkeit	N/mm ²	40	40	45
E-Modul(aus Biegeversuch)	N/mm ²	11.600	12.000	10.500
Druckfestigkeit	N/mm ²	50	60	----
Wärmeleitfähigkeit*	W/m.K	14	20	13
Wärmeausdehnungskoeffizient**	1/K.10 ⁻⁰⁶	27	14	----
Spezifischer elektrischer Widerstand **	Ω.µm	180	100	230
Elektrischer Widerstand*	mΩ.cm ²	12	11	----
Betriebstemperatur	°C	≤ 80	≤ 120	≤ 130
Härte***	HB	12,5	13,4	17,3
Zugfestigkeit***	N/mm ²	12	3,37	
Chemische Zusammensetzung				
Graphitanteil	Gew.-%	86%	85%	ca. 80%
Kunststoffbinder	Gew.-%	14% PP	15% PVDF	20% PP

* Eigenschaften senkrecht zur Plattenebene/** Eigenschaften in der Plattenebene

** Werte ermittelt im Rahmen dieser Dissertation

Tabelle 4.2: Physikalische Eigenschaften der verwendeten hochgefüllten Graphit-Compounds [NN15⁺, NN15⁺⁺]

4.2.2. Ermittlung der Glasüberübergangstemperaturen der Graphit-Compound-Werkstoffe

Zur thermischen Charakterisierung der verwendeten Graphit-Compounds wurde eine DSC-Analyse (Differential Scanning Calorimetry) sowie DMA-Analyse (Dynamische Mechanische Analyse) am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik durchgeführt. Damit konnten das Schmelzverhalten sowie die Erweichungstemperatur in Abhängigkeit des Wärmestroms ermittelt werden (Abbildungen 4.5 - 4.6). Dies ist in den folgenden Schweißuntersuchungen unerlässlich, um die Vorwärmungstemperaturen einzustellen.

Diese beiden Verfahren gehören zu den wichtigsten bei der Charakterisierung von Kunststoffen. Mit der DSC-Analyse kann Messung von Schmelz-, Umwandlungs-, Zersetzungs- und Vernetzungsenthalpien und deren genaue Temperaturlage durchgeführt werden [NN14*]. In einer DSC Kurve wird der Wärmestrom über die Zeit dargestellt. Damit werden die spezifische Temperaturlagen der Enthalpieabweichung des Materials gezeigt. Dazu kann über die Peakfläche, welche durch die rote Grundlinie begrenzt ist, die notwendige

Energie, die durch Kristallisieren, Vernetzen oder Schmelzen freigesetzt, bzw. benötigt wurde, bestimmt werden. Die Messzelle besteht aus jeweils einem Probenziegel und Referenzziegel, die sich in einem Temperaturofen befinden. Während des gesamten Messprozesses wird der Ofen mit konstanter Heizrate erwärmt. Die Temperaturdifferenz zwischen Probe und Referenzprobe wird mit Thermoelementen ermittelt. Aus dieser Differenz wird die Wärmestromänderung berechnet. Damit sich der Referenzziegel entsprechend der eingestellten Heizrate erwärmen kann, bleibt dieser bei Messungen von Thermoplasten und Metallen leer. Hieraus ergibt sich die Basislinie [Ehr03, NN14*]. Die DSC-Linie unterteilt in sich in einen endothermen und exothermen Bereich. Zu Beginn hat die Probe ein Temperatur von ca. -100°C und wird kontinuierlich mit konstanter Heizrate erwärmt. Bei ca. 58°C wird der Glasübergangsbereich erreicht. Somit weicht der Wärmestrom des Probenziegels von der Basislinie ab. Bei weiterer Erwärmung setzt sich der Umkristallisationsprozess fort. Dafür wird Energie gebraucht, dann das Kristallgitter wird aufgebrochen, sodass der Kunststoff sich amorph verhält. Diese Phase wird durch erneute Enthalpieänderung bei ca. 160°C gekennzeichnet (Peakfläche 1). Die Temperatur in diesem Bereich (Peaktemperatur) bezeichnet die Schmelztemperatur des Polymerbinders im Graphit-Compound, die während des Schweißprozesses von Kunststoffen erreicht werden sollte, damit eine formschlüssige Verbindung hergestellt werden kann. Im weiteren Verlauf der DSC-Messung wird die Probe abgekühlt. Hierdurch wird Energie frei und Kristallite bilden sich. Auch hier wird erneut eine Enthalpieänderung aufgenommen, die sich in exothermen Bereich befinden (Peakfläche 2). Dieser Messverlauf wird nach Aushärtung erneut wiederholt [NN04, Fri15].

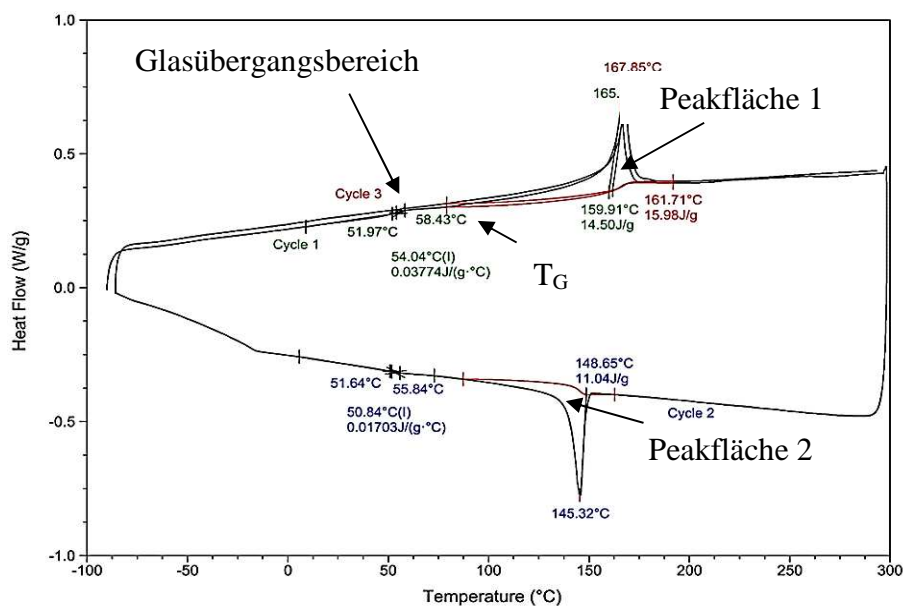


Abbildung 4.5: DSC-Analyse der PPG86

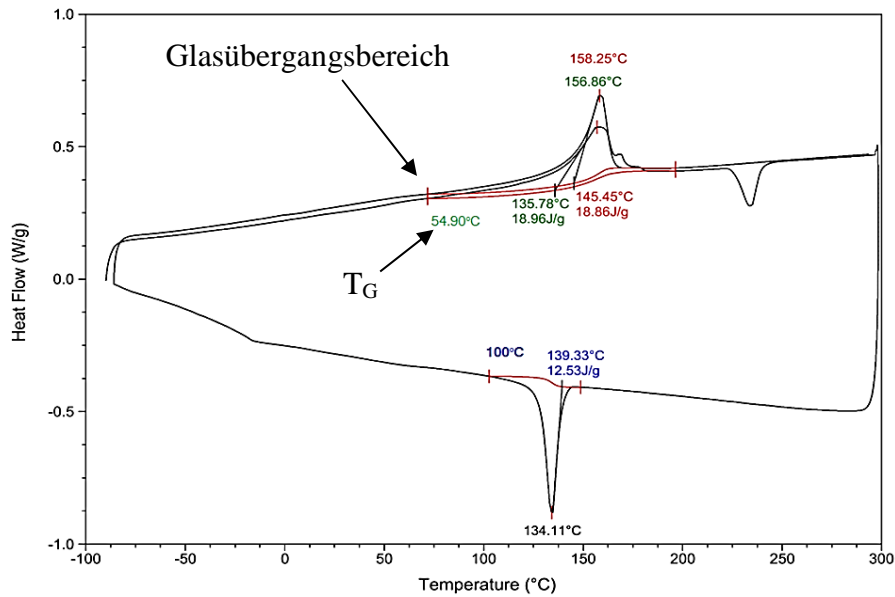


Abbildung 4.6: DSC-Analyse der BMA5

Die DMA-Analyse dient zur Ermittlung der mechanischen-thermischen Eigenschaften von Kunststoffen, abhängig von der Temperatur. Die eingesetzten Compounds zeichnen sich durch extrem geringe Druckfestigkeit, daher ist die Schweißung sehr aufwendig möglich. Mit der DMA-Untersuchung wurde das mechanische Antwortverhalten der Proben (10 x 10 x 3 mm) unter mechanisch geringer, periodischer, sinusförmiger Belastung per 3-Punkt-Biegung gestellt [NN14*]. Diese Belastungsform ist mit derjenigen während des Ultraschallschweißprozesses vergleichbar und stellt einen Überblick über den rheologischen Verlauf während der Anmelzphase des Graphit-Compounds durch die longitudinalen Schwingungen. Die TanDelta Kurve bezeichnet die mechanische Dämpfung (Verlustfaktor) und errechnet sich aus dem Quotienten von Speichermodul und Verlustmodul. Die Glasübergangstemperatur kann mittels drei Methoden aus der Temperaturlage grafisch ermittelt werden, nämlich aus dem Wendepunkt des Speichermoduls (Abbildung 4.7), aus dem Maximum des Verlustmoduls (Abbildung 4.8) oder aus dem Maximum des Verlustfaktors [Ehr97].

In beiden Fällen ist bemerkbar, dass die Glasübergangstemperatur T_G des Graphit-Compounds PPG86 und BMA5 aufgrund hohem Graphitanteil höher ist als die des Polymer-Binders PP und PVDF. Diese beträgt bei PP zwischen 0 und 20 °C und bei PVDF 45 °C [NN04, Fri15]. Bei der DSC-Messung beträgt diese 54,04 °C und jeweils 54,90 °C für PPG86 und BMA5. Die Auswertung erfolgte durch Anlegen von Tangenten beziehungsweise an die Wärmefluss-Temperatur-Kurve (Glasübergangsbereich). Bei DMA-Analyse entsprechen die T_G -Werte denjenigen aus den DSC-Untersuchungen mit geringen Abweichungen.

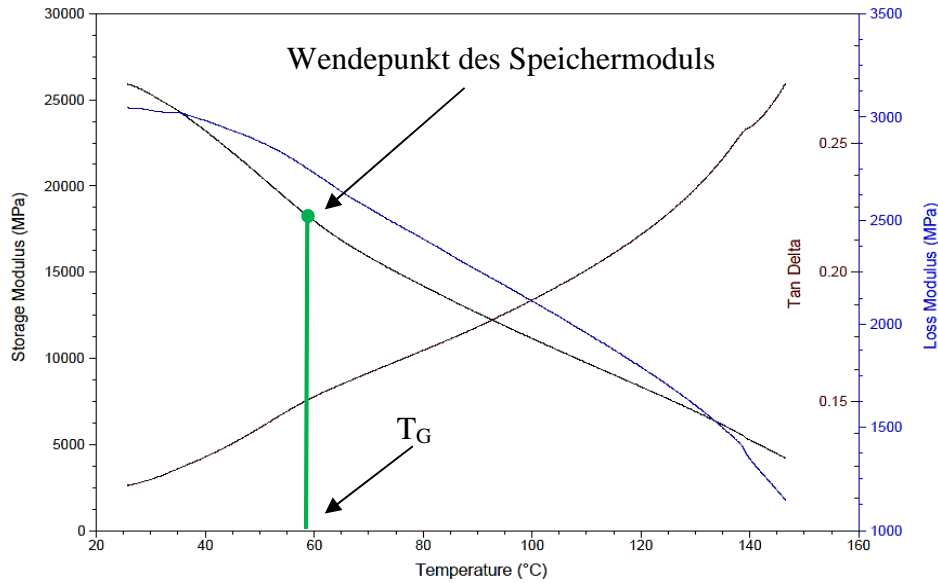


Abbildung 4.7: DMA-Analyse der PPG86-Platte

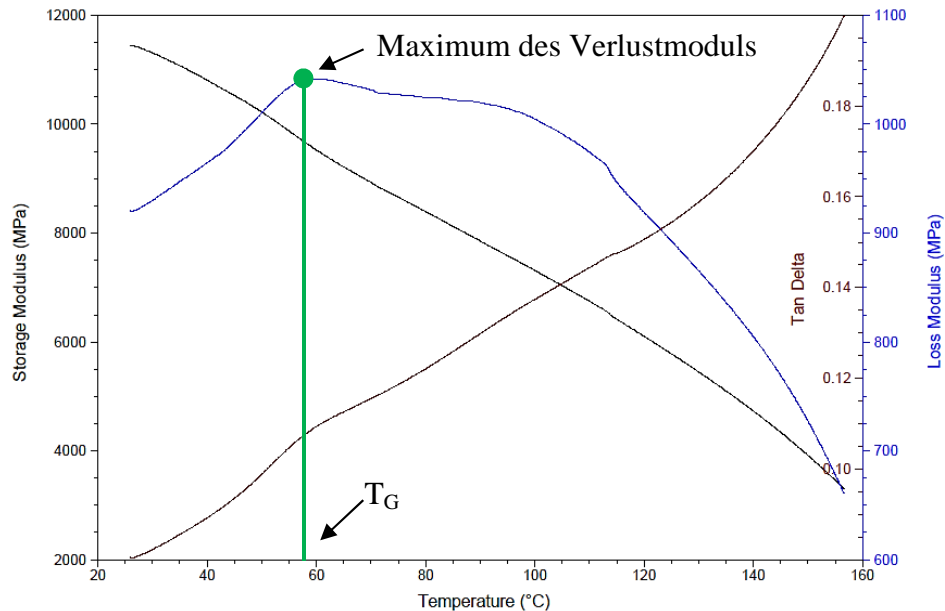


Abbildung 4.8: DMA-Analyse der BMA5-Platte

Laut Wodara [Wod04] hat die Oberflächenrauigkeit einen wichtigen Einfluss auf die mechanische Festigkeit der Fügeteile. Eine zu hohe Rautiefe verhindert die Relativbewegung durch das mechanische Ineinandergreifen der Rauigkeitsspitzen in der Fügezone und somit den Abbau der Rauigkeiten der einzelnen Fügeteile. Dadurch wird die Festigkeit reduziert. Da bei den folgenden Untersuchungen um formschlüssige Verbindung handelt, war es notwendig, das Rauheitsprofil des Graphit-Compounds zu ermitteln. Die ermittelten Rautiefen schließen das Präsenz Graphitspitzen an der Oberfläche und somit eine Hinderung der Relativbewegung während des Schweißprozesses aus.

4. Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

In den Abbildungen 4.9 - 4.11 sind die REM-Bilder der Oberflächen sowie dreidimensionalen Oberflächen-Modellierungen der graphithaltigen Platten dargestellt. Diese wurden mittels stereografischer REM-Bildern errechnet. Die Rauheitswerte sind in Tabelle 4.3 aufgelistet:

	PPG86	BMA5	TECACOMP® PP
R_a in µm	0,39	0,48	1,4
R_z in µm	2,93	3,49	7,9
R_{max} in µm	3,09	4,66	9,7

Tabelle 4.3: Rauheitsmessung der hochgefüllten Graphit-Compounds

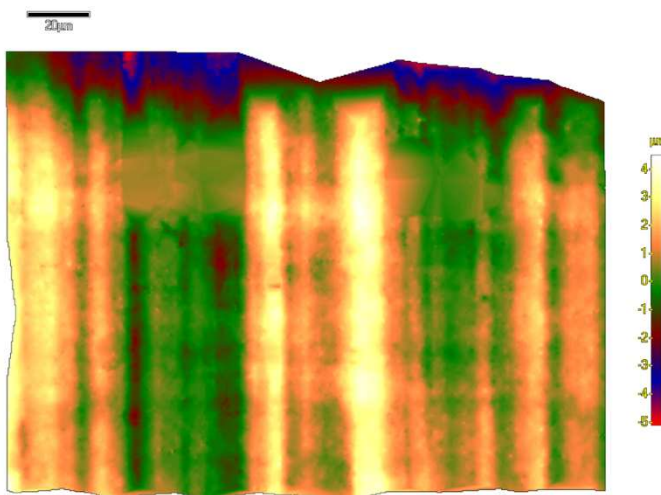
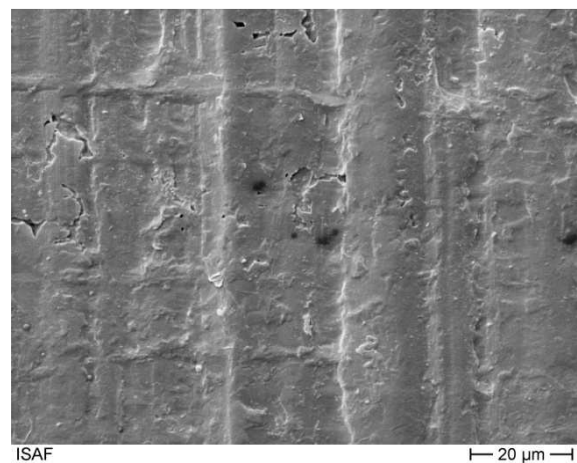


Abbildung 4.9: a) 3D Rauheitsprofil an PPG86-Platte



b) REM-Aufnahme der Oberfläche an PPG86-Platte

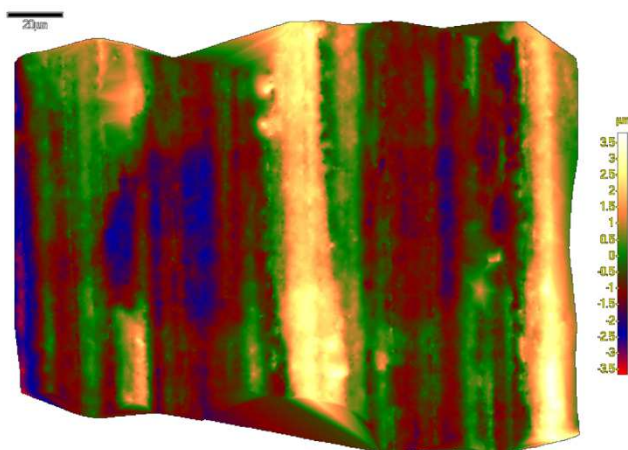
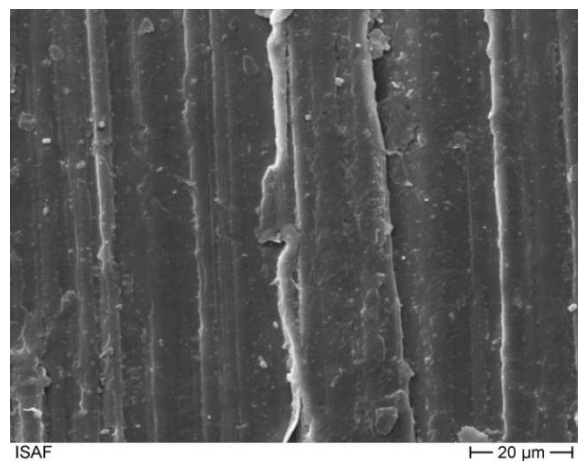


Abbildung 4.10: a) 3D Rauheitsprofil an BMA5-Platte



b) REM-Aufnahme der Oberfläche an BMA5-Platte

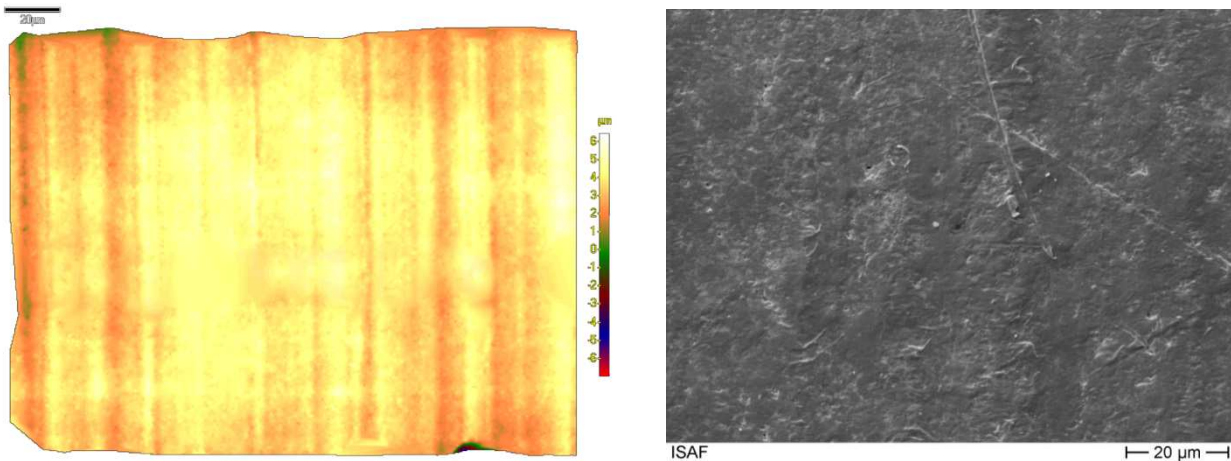


Abbildung 4.11: a) 3D Rauheitsprofil an TECACOMP-Platte b) REM-Aufnahme an TECACOMP-Platte

4.2.3. Elektrische Leitfähigkeitsmessung von Graphit-Compounds

Um ein elektrisches Leitfähigkeitsprofil der untersuchten Compound-Platten (25 x 25 x 3 mm) zu erstellen, wurde eine Leitfähigkeitsmessung am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik der TU Clausthal senkrecht zur Oberfläche bei Raumtemperatur an ca. 50 Stellen pro Probe vollgezogen. Die Messung wurde in Anlehnung an Stübler [Stü14] auf Basis einer 4-Punkt-Methode mit einer RM3000-Messeinheit der Firma Jandel Engineering Limited vorgenommen. Damit kann ein Strom zwischen 10 mA und 99,9 mA eingestellt werden. Weiterhin kann ein Spannungsbereich zwischen 0,01mV und 1,25 V gemessen werden [Stü14]. Die elektrische Leitfähigkeit wurde über Spannung, Strom und geometrische Faktoren in Abhängigkeit von der Probengeometrie ermittelt. Stübler [Stü14] erwähnte, dass im Idealfall die Graphit-Compounds für die Anwendung in Brennstoffzellen-Bereich einen erhöhten Graphit-Anteil mit gleichmäßigem Zerstreuungsgrad aufweisen müssen. Die DoE (U.S. Department of Energy) hat in diesem Zusammenhang 100 S/cm als Referenzwert definiert.

In Abbildung 4.12 lässt sich erkennen, dass die DoE (U.S. Department of Energy) Grenze nicht erreicht wurde und Abweichungen zwischen den beiden Herstellungsverfahren bezüglich Zerstreuung des Graphits an der Oberfläche stattgefunden haben. Als Ursache dafür ist die Entstehung von Anhäufungseffekte der Graphitpartikel während der Bearbeitung. Die TECACOMP-Platte weisen die niedrigsten Werte mit einem Durchschnitt von 35,41 S/cm. Dies ist vor allem auf den hohen Anteil des PP-Binders zurückzuführen. Die BMA5- und PPG86-Platten besitzen einen Durchschnitt von jeweils 55,61 und 70,45 S/cm.

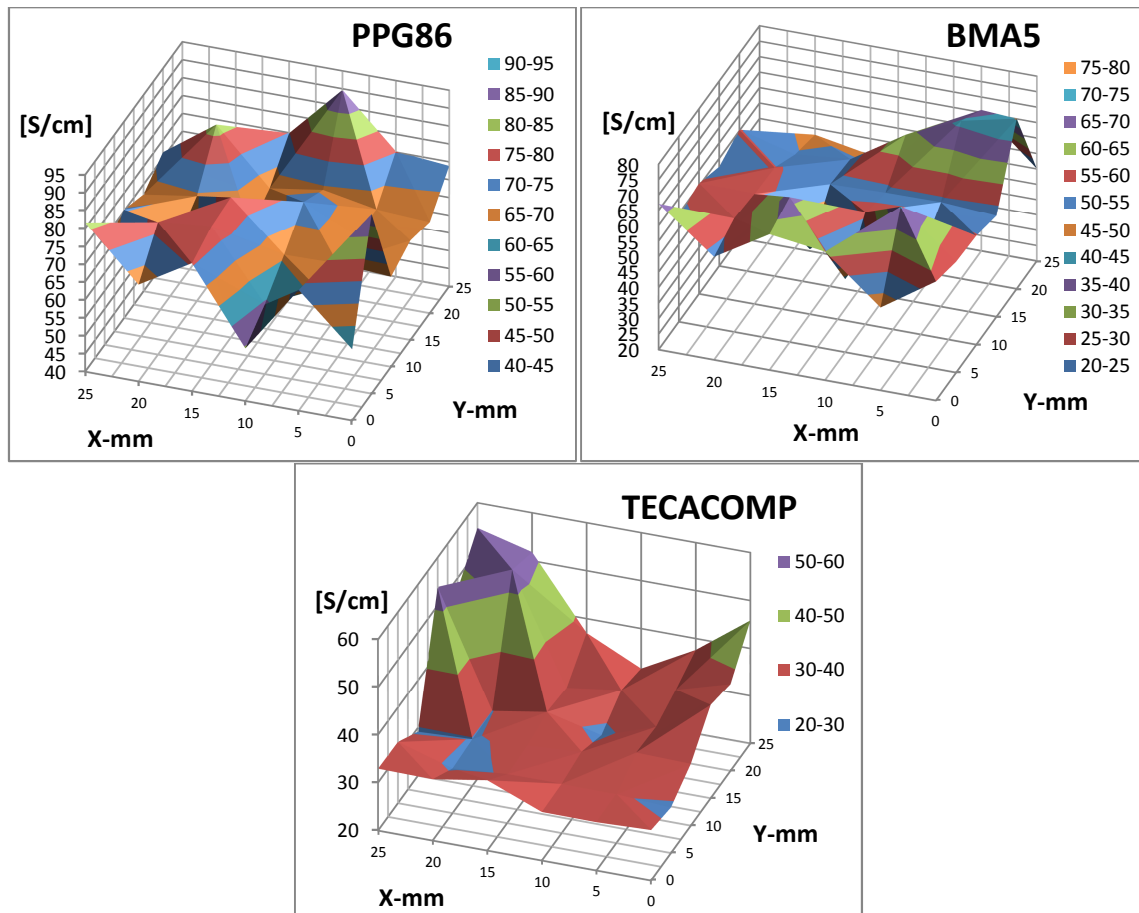


Abbildung 4.12: Elektrische Leitfähigkeitsmessung der untersuchten Graphit-Compounds

4.2.4. Metallische Werkstoffe

Sowohl bei den Voruntersuchungen als auch beim aufgestellten Versuchplan wurde ein Drahtgeflecht als metallischer Fügepartner gewählt. Dies hat zum einen den Vorteil, dass nach Abschluss des Schweißvorgangs die Schweißzone sowie das Auftreten von Brüchen visuell mit bloßem Auge beurteilt werden kann.

Außerdem trägt die geflochtene Geometrie zur schonenden Belastung des Compounds aufgrund geringerer Eindringsfläche des Netzes, im Vergleich zur Folie, während des Schweißvorgangs bei.

Da die Graphit-Compounds eine sehr hohe Sprödigkeit aufweisen und somit sehr bruchempfindlich sind, musste die Gestaltung des oberen Fügepartners in Betracht gezogen werden. Die verwendeten Metallgeflechte haben einen Drahtdurchmesser von 0,1 mm (Ni) und 0,25 mm (1.4301) mit einem Abstand zwischen benachbarten Drähten jeweils von 0,5 mm und 1 mm. Ein höherer Drahtdurchmesser von 0,4 mm hat zum 30 % höheren Schweißdruck sowie Rissrate um 35 % für die Compound-Platten geführt.

		1.4301- Geflecht	Ni- Geflecht
Drahtdurchmesser	mm	0,25	0,10
Dichte	g/cm ³	7,90	8,90
E-Modul	kN/mm ²	28,6	24,6
Streckgrenze $R_{p0,2}$ *	N/mm ²	353,19	287,69
Zugfestigkeit R_m *	N/mm ²	820,83	482,10
Bruchdehnung *	%	51,20	10,52
Härte *	HV0.1	246	205
Elektrische Widerstand bei 20°C	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$	0,73	9-54
Wärmeleitfähigkeit bei 20°C	W/m.K	15	69
Spez. Wärme Kapazität bei 20°C	J/kg.K	500	0,49
Wärmeausdehnungskoeffizient bei 20°C	1/K. 10^{-06}	16	14

*Werte ermittelt im Rahmen dieser Dissertation

Tabelle 4.4: Mechanische und physikalische Eigenschaften der verwendeten metallischen Werkstoffe [NN2015, Hue15]

Dadurch kann eine klare Übersicht der Schweißzone hinsichtlich einer möglichen Bruchgefahr geschaffen werden. Eine zweite Randbedingung bei der Auswahl war der spätere Einsatz der Verbindung. Da es hier um Brennstoffzellen geht, mussten die Umgebungsbedingungen betrachtet werden. Somit war die elektrische Leitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit am wichtigsten.

Aus diesem Grund wurden Nickel- und 1.301-Edelstahlgeflechte ausgewählt. Deshalb war wenig über die chemischen und mechanischen Eigenschaften bekannt und somit eine Reihe von analytischen Untersuchungen zur Charaktisierung notwendig.

Bestimmte physikalische Werte für Nickel- und Edelstahllegierungen sind in Tabelle 4.4 aufgelistet.

Zu Überprüfung der chemischen Zusammensetzung und Beurteilung der Geflecht-Geometrie (Abbildung 4.13-A und 4.14-A), sowie der Oberflächenbeschaffenheit, wurden die Geflechte mittels Rasterelektronenmikroskop (CamScam Serie 4) und energiedispersiven Röntgen-Detektor (EDX) untersucht. Abbildung 4.13 und 4.14 zeigen die Geflechte und das dazugehörige EDX-Spektrum. Das aufgenommene Spektrum ist typisch für die verwendeten Nickel- und Edelstahllegierungen. Die Herstellungsverfahren von drahtförmigen Körpern ist in DIN 8593 genormt. Das Herstellen von Drahtgeflecht wird mit Drahtflechten und Drahtweben durchgeführt. Die eingesetzten Netze wurden als Leinwand mit einer glatten Bindung im ständigen Wechsel über- und unterlaufen mittels Drahtwebeverfahren hergestellt. Während des Einschließprozesses von Quer- und längslaufenden Drähten spreizen diese in rhythmischer Reihenfolge nach unten und oben weg. Beim Drahtflechten werden die

4. Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

räumlichen Drahtflechte (zum Beispiel Fließgitter oder Maschendrahtzaun) durch gegenseitiges Umschließen beziehungsweise Verdrillen erzeugt [Lan93].

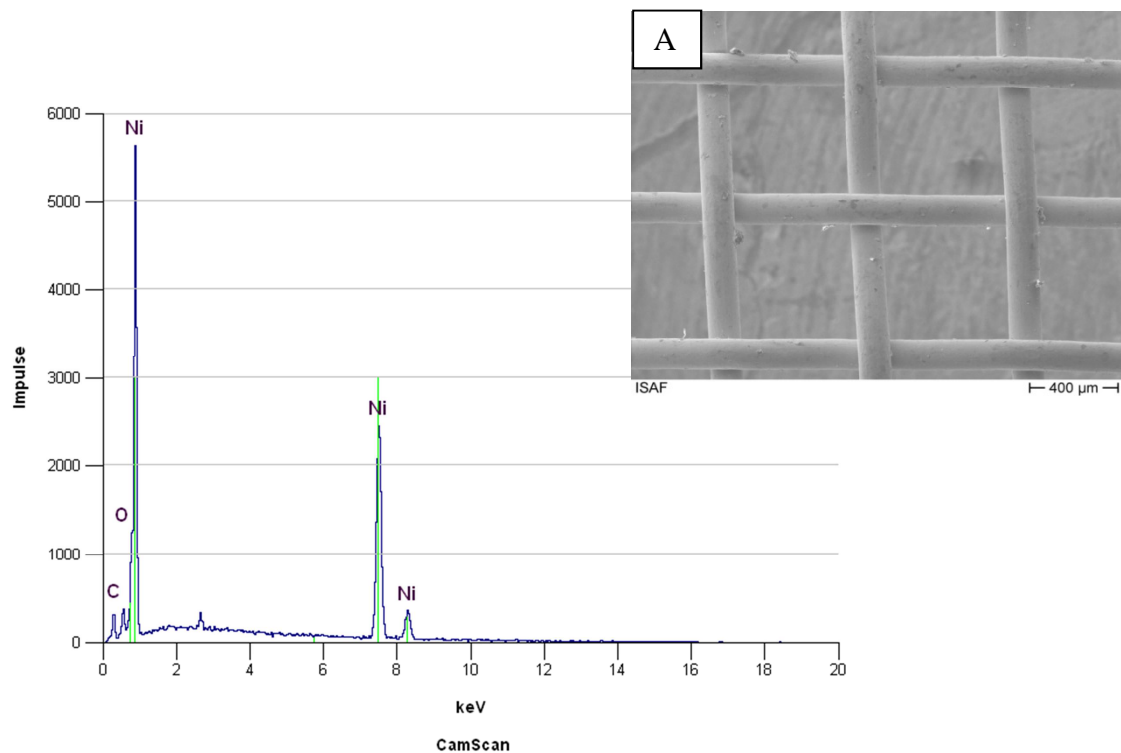


Abbildung 4.13: Spektrum-EDX-Analyse des Ni-Netzes

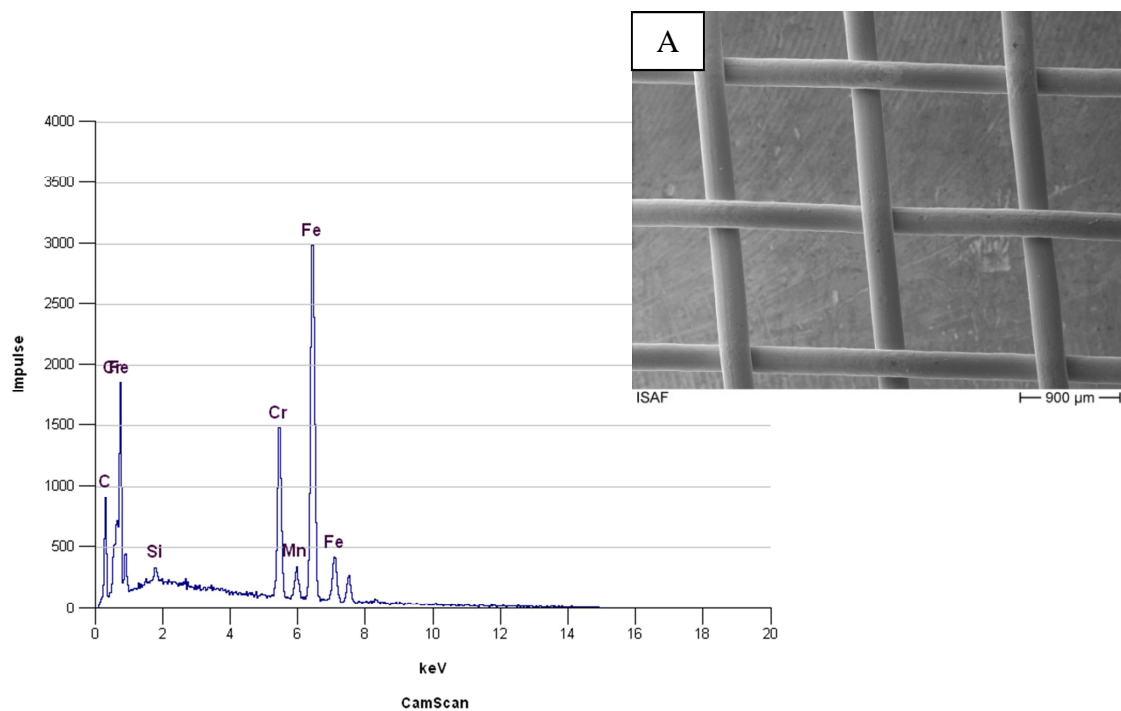


Abbildung 4.14: Spektrum-EDX-Analyse des 1.4301-Netzes

Die EDX-Analyse ist ein weit verbreitetes Messverfahren bei den mikronalytischen Untersuchungen in der Materialwissenschaft. Die Atome werden im mikroskopischen Bereich gleichzeitig zu Emission durch einen Elektronenstrahl gleicher Energie angeregt. Der primäre Elektronenenergiewert in keV ist gleich der gewählten Beschleunigungsspannung. Das Rasterelektronenmikroskop ist mit einem energiedispersiven Röntgendetektor als Strahlungsempfänger ausgestattet. Dieses besitzt einen Silizium-Halbleiterdetektor mit einem strahlungsempfindlichen Volumen. Durch Abkühlung des Si(Li)-Detektors werden bessere Energieauflösungen erreicht. Somit ist das reale Messspektrum sowohl von der Anregung der Röntgenstrahlarten als auch von deren Absorption in der Probe abhängig [Egg05].

4.2.5. Probengeometrie

Die verwendeten Graphit-Compound-Platten sowie die metallischen Geflechte haben ebenfalls eine rechteckige Geometrie von 30 x 30 x 3 mm (Abbildung 4.15). Aufgrund der Notwendigkeit, diese Platten vor und während des Schweißprozesses vorzuwärmen, wurden sie als untere Fügepartner vorgesehen.

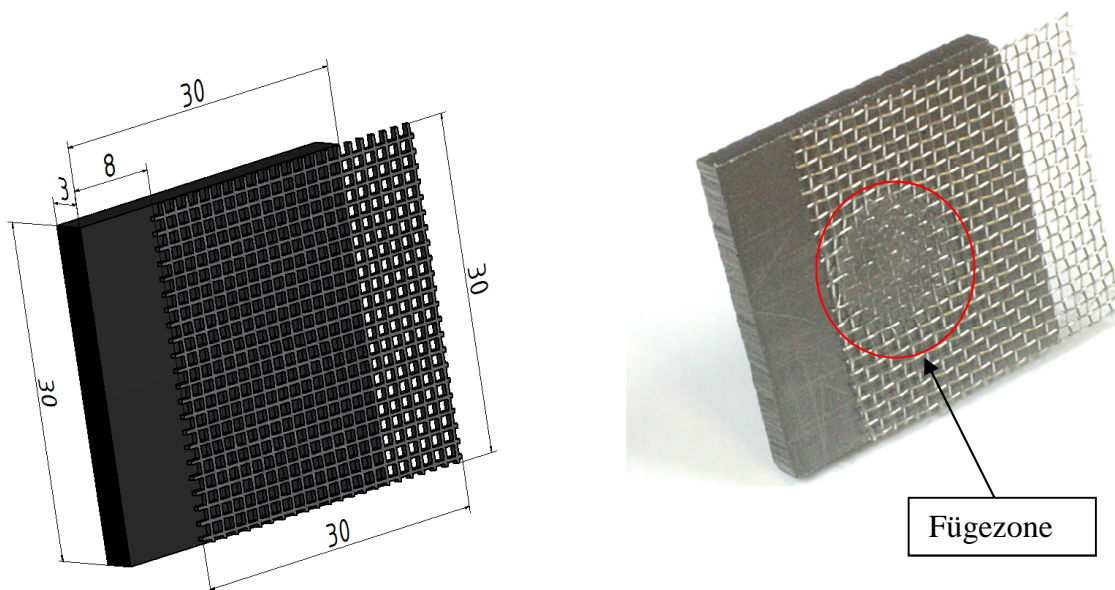


Abbildung 4.15: Probengeometrie schematisch (links) und real (-rechts)

Diese Anordnung nimmt die hohe Sprödigkeit des Graphits in Betracht. Nach zahlreichen Voruntersuchungen zeigte sich, dass die Graphit-Compounds als obere Fügepartner ungeeignet sind. Die Anzahl der erfolgreichen Schweißungen waren nur 5 %. Ein zweites festgestelltes Ergebnis war die Auswahl der Fügefläche. Für die Untersuchungen laut der Versuchsplanung war zuerst geplant, dass die Fügezone zur Vereinfachung der

Scherzugversuche nicht in der Mitte der Platte liegt, sondern 5 mm von der vorderen Amboss Kante liegt (Abbildung 4.3). Bei den Screening-Versuchen zur Festlegung der Grenzbereiche der Schweißparameter wurde eine hohe Anzahl von Brüchen beobachtet.

4.2.6. Sonotrodengeometrie

Wie in Kapitel 3.3.4 beschrieben ist die Sonotrode das eigentliche Schweißwerkzeug, das die Druckkraft, Amplitude und Frequenz an die Fügeteile überträgt. Darum ist die Sonotrodenform entscheidend bei der Auslegung der gewünschten Schweißamplitude und somit der Schweißnahtfestigkeit.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde eine stufenförmige Sonotrode mit runder Arbeitsfläche (\varnothing 16 mm) verwendet. Nach Einmessung wurde festgestellt, dass diese Sonotrode eine Amplitude von 28,5 μm besitzt. Diese hat zur Herstellung eines PPG/Ni- sowie BMA5/Ni-Verbundes ausgereicht, aber schränkt das Variationsspektrum der anderen Schweißparameter ein. Bei den Ultraschallschweißungen von PP- und PVDF-Polymeren wurde aus der Praxis der Firma Hermann [NN14⁺, Moh15] eine Amplitude von 38 und 40 μm bei 20 kHz als Referenz empfohlen.

Bei den Pilotuntersuchungen zur Definition des Schweißparameterbereich wurde festgestellt, dass für Untersuchungen nach statistischen Versuchplänen ein Sonotroden-Durchmesser von 16 mm mit sehr eingeschränktem Bereich der Schweißzeit (0,2 - 0,4 s) eine Schweißenergie (60 - 70 J) für PP realisieren kann. Aufgrund des Schmelztemperatur-Unterschiedes zwischen PP und PVDF muss dieses Parameterspektrum noch enger ausgelegt werden. Darum wurde eine zweite Sonotrode mit einer Arbeitsfläche von \varnothing 14 mm entwickelt (Abbildung 4.16). Mit dieser lässt sich ein breites Spektrum an Schweißparametern einstellen, sowohl für PPG86 als auch für BMA5.

Die stufenförmige Form der Sonotrode gehört seit Erfindung des Ultraschallschweißens zum Allrounder bei Untersuchungen noch unerforschter Schweißverbindungen. Aufgrund der einfachen Auslegung ermöglicht diese eine longitudinale Schwingungsform mit sehr geringen Quer- und Torsionschwingungen sowie homogener Stressverteilung und Einfachheit bei erforderlicher Nacharbeitung. Als Sonotrodenwerkstoff wurde eine Titanlegierung der Zusammensetzung TiAl6V4 von Firma Zapp ausgewählt (Tabelle 4.5).

			TiAl6V4			
Dichte		g/cm ³	4,42			
E-Modul		N/mm ²	114000			
R _{p 0,2} bei 20°C		N/mm ²	≥ 828			
R _m bei 20°C		N/mm ²	≥ 828			
Schallgeschwindigkeit (C) ¹		N/mm ²	4900			
Wellenlänge (c/2f)			112,5			
Chemische Zusammensetzung¹						
Werkstoff	Fe	C	N	O	H	
Gew.-%	≤ 0,3	≤ 0,08	≤ 0,05	≤ 0,2	≤ 0,015	

¹ gemessen

Tabelle 4.5: Physikalische und chemische Eigenschaften des Sonotrodenmaterials nach [Zap15]

Grundsätzlich gilt: Bei weichen Werkstoffen und Kleinserienfertigung hat Aluminium aus Kostengründen den Vorrang [Zie00]. Da es hier um einen Verbund zweier harter Werkstoffe (Edelstahl/hochgefülltes Graphit) mit unbekanntem Schweißverhalten geht und ein optimales Schwingungsverhalten benötigt wird, wurde Titan als Sonotrodenwerkstoff eingesetzt. Die zweiphasigen, aushärtbaren Titanlegierungen [Die00] gehören als Sonotrodenwerkstoff, trotz hoher Rohmaterialkosten im Vergleich zu Stahl oder Aluminium aufgrund ihrer Amplitudenweite, Standzeit und ihres möglichen realisierbaren Übersetzungsverhältnisses, zum Stand der Technik. Die Materialeigenschaften sind nicht die entscheidenden Faktoren bei der Auslegung der Sonotrode, sondern es hängt von anderen Faktoren wie der Geometrie und dem Schwingungsverhalten ab. Dies ist aufgrund des Schwingsbereiches nur optisch mittel Laserstrahl messbar.

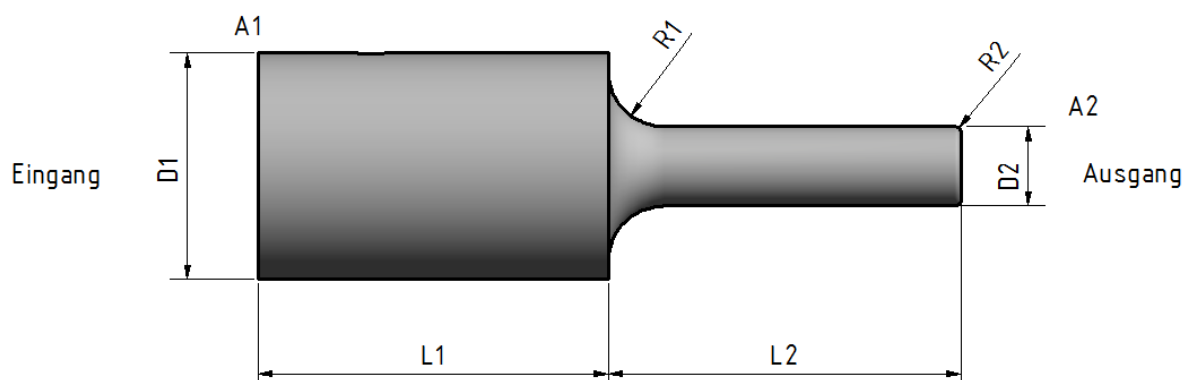


Abbildung 4.16: stufenförmige Sonotrode

$$L = L_1 + L_2 = k_1 + \left(\frac{c}{4f}\right) + k_2 + \left(\frac{c}{4f}\right) \quad (4.1)$$

$$i = \frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (4.2)$$

In vielen Fällen schwingt die Sonotrode manchmal nicht in der richtigen Schwingungsform, trotz scheinbar guter Abstimmung der Eigenfrequenz. Dies hängt von vielen übersehbaren Faktoren wie Gewindeverschleiß am Verbindungsbolzen zu Bosster und lässt sich spätestens bei den Schweißversuchen erkennen.

Nachfolgend werden die Sonotroden nach DVS 2216-5 zugrundegelegt. Diese Norm ist seit 1992 veröffentlicht und gilt bis heute als gültige Referenz für rotationssymmetrische Sonotroden mit einer Frequenz von 20 kHz. Die Bestimmung der Gesamtlänge kann in Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit des Sonotrodenwerkstoffes und der Arbeitsfrequenz (Gleichung 4.1) erfolgen, wobei k_1 und k_2 Korrekturfaktoren und zu beiden Querschnitten proportional sind. Dadurch können die Teillängen grafisch ermittelt werden.

Die in Tabelle 4.6 ausgelegten Sonotroden wurden ebenfalls nach dieser Vorgehensweise ausgelegt.

		Sonotrode A Ø14mm	Sonotrode B Ø16mm
Frequenz	Hz	20000	20000
Eingangsdurchmesser D_1	mm	40	40
Ausgangsdurchmesser D_2	mm	14	16
Eingangsfläche	mm ²	1256,6	1256,6
Ausgangsfläche	mm ²	154	201
Eingangsamplitude	µm	10	10
Ausgangsamplitude (volle Länge)	µm	81,6	62,5
Transformationsverhältnis i		8,2	6,25
Korrektur aus Diagramm (DVS, Steigung)	-0,04		
Achsenabschnitt nach C	mm	62,5	62,5
Abschnittslänge L_1	mm	62,4	62,4
Abschnittslänge L_2	mm	62	62
Gesamtlänge Sonotrode	mm	124,4	124,4

Tabelle 4.6: Auslegung der Sonotroden nach [DVS 2216-1]

Heutzutage gehört die numerische Simulation beim Entwurf von Ultraschallsonotroden mittels Finite-Elemente-Methode zum Stand der Technik. Dabei wird mittels CAD-Programmen (zum Beispiel Autodesk Inventor) der Sonotroden-Körper entworfen. Zur Untersuchung des Resonanzverhaltens und der Amplitudenverteilung wurde im Rahmen dieser Arbeit die Simulationssoftware ANSYS Workbench 14.5 eingesetzt. Damit könnte mit Hilfe der Modalanalyse die Eigenmoden (Längs-, Biege- und Torsionsschwingung) der Sonotrode in einem vordefinierten Frequenzbereich berechnet werden. Mit der harmonischen Analyse könnte zusätzlich das Verhalten der longitudinalen und transversalen

Schwingungsamplitude betrachtet werden. Dies ist nur möglich wenn die gesamte Dämpfung der der Resonanzeinheit an der Ultraschallanlage bekannt ist.

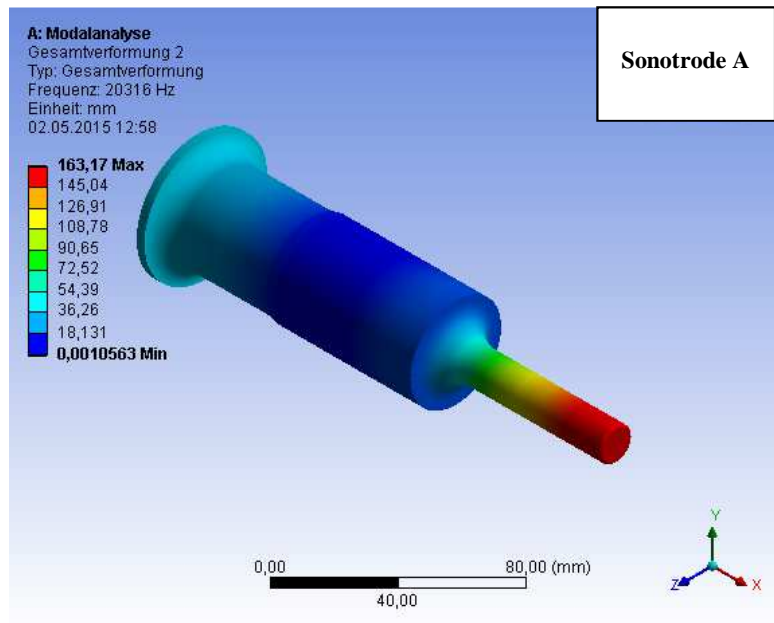


Abbildung 4.17: Ermittlung der Eigenfrequenz der Baugruppe Booster-Sonotrode A mit FEM

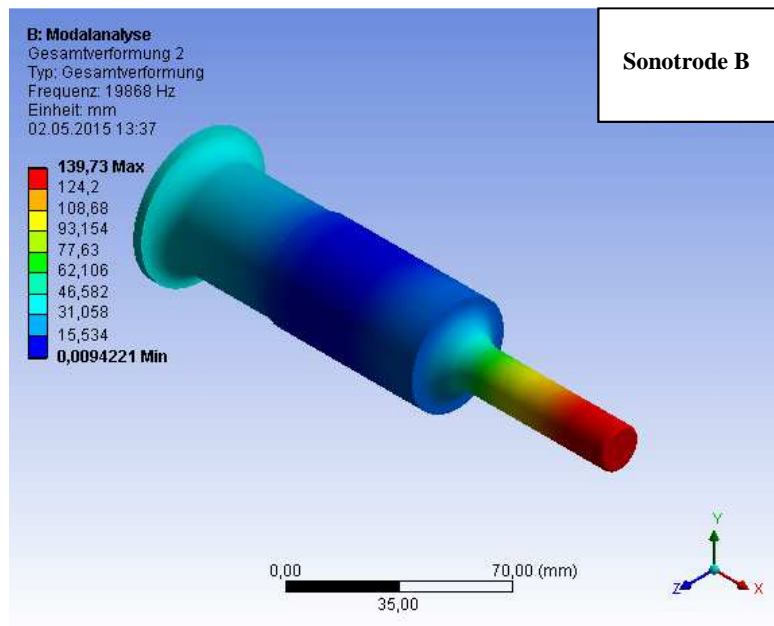


Abbildung 4.18: Ermittlung der Eigenfrequenz der Baugruppe Booster-Sonotrode B mit FEM

Bei der Modellanalyse wurden alle Eigenfrequenzen der Sonotroden ermittelt, wobei beim Ultraschallschweißen die Eigenfrequenz in Längsrichtung relevant ist (Abbildung 4.17 - 4.18). Aus dieser Analyse war die optimale Amplituden-Verteilung an der Sonotrodenspitze ersichtlich. Dazu ergab sich für Sonotrode A und B eine jeweilige Eigenfrequenz von 20315

und 19869 Hz. Die nach DVS 2216-1 berechneten sowie mittels Laservibrometrie eingemessenen Werten unterscheiden sich nur geringfügig.

Um die rechnerisch ausgelegte Sonotrode und deren Schwingungsverhalten im realen Zustand zu betrachten, wurde diese an der Herfurth-2500C-Anlage angeschraubt und eingemessen.

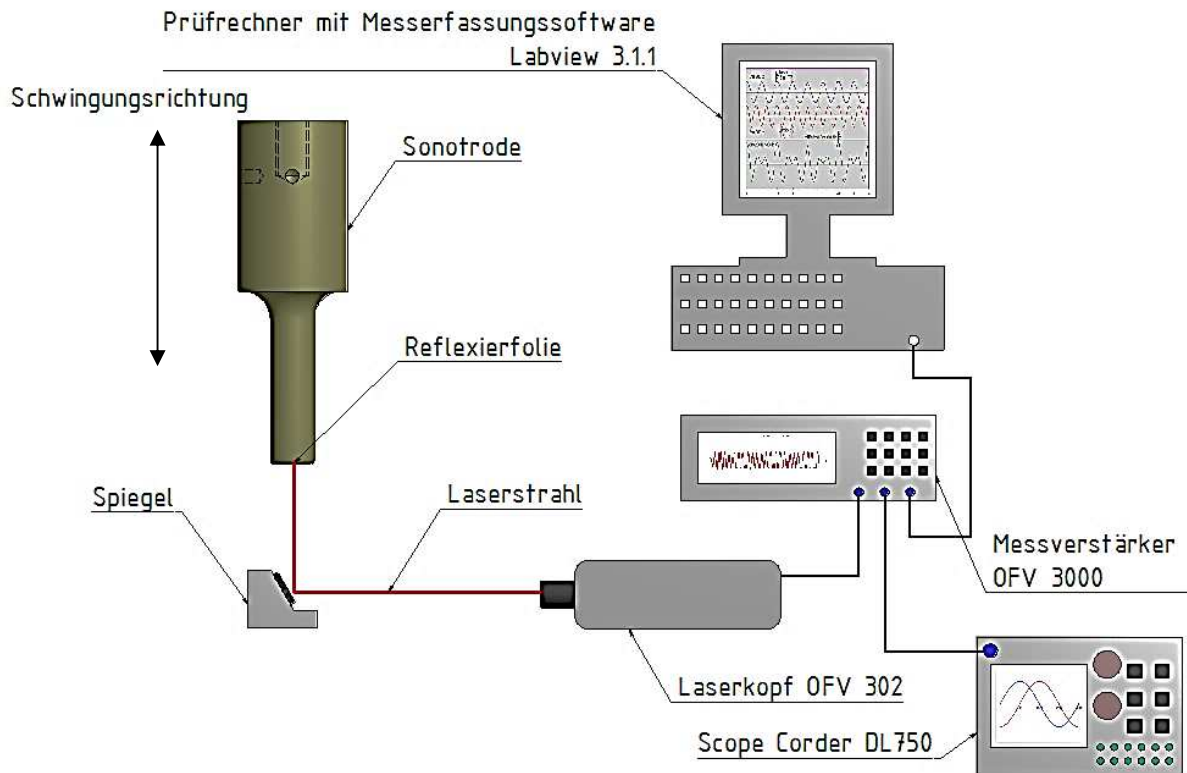


Abbildung 4.19: Versuchsaufbau des Sonotroden-Einmessungssystems

Dies geschieht (Abbildungen 4.20 - 4.21) mittels Laserinterferometers vom Modell OFV 3000 mit einem Laservibrometer 302 der Firma Polytec.

Die übertragenen Messwerte werden an einem Prüfrechner, ausgestattet mit der Messwerterfassungssoftware Labview 3.1.1, der Firma National Instruments Corporation weitergeleitet und ausgewertet. Unter Leerlaufleistung wird damit die Eigenfrequenz und die Amplitude der Sonotrode abgebildet (Abbildung 4.19). Zuerst werden gleichzeitig der Ultraschallgenerator und die Messwerterfassung gestartet.

Die Sonotrode beginnt zu schwingen. Die angeregten Schwingungen werden in Abhängigkeit der Geschwindigkeit durch interferometrische Messung registriert und parallel von Labview umgewandelt. Durch mathematische Gleichungen wird bei bestimmten Frequenzen die Wegamplitude durch Integration der Geschwindigkeitsamplitude kalkuliert. Um den Amplitudenverlauf bis zum Ende der Schwingungsperiode aufzunehmen, wurde diese bei der Einmessung während der Leerlaufleistung des Generators mittels YOGAWA Scope Corder

DL750 (Hochleistungsoszilloskop) aufgenommen (Abbildung 4.22). Daraus lässt sich eine Übereinstimmung der Amplitudenhöhe während des Betriebs erkennen, wobei keine Unregelmäßigkeiten aufgetreten sind.

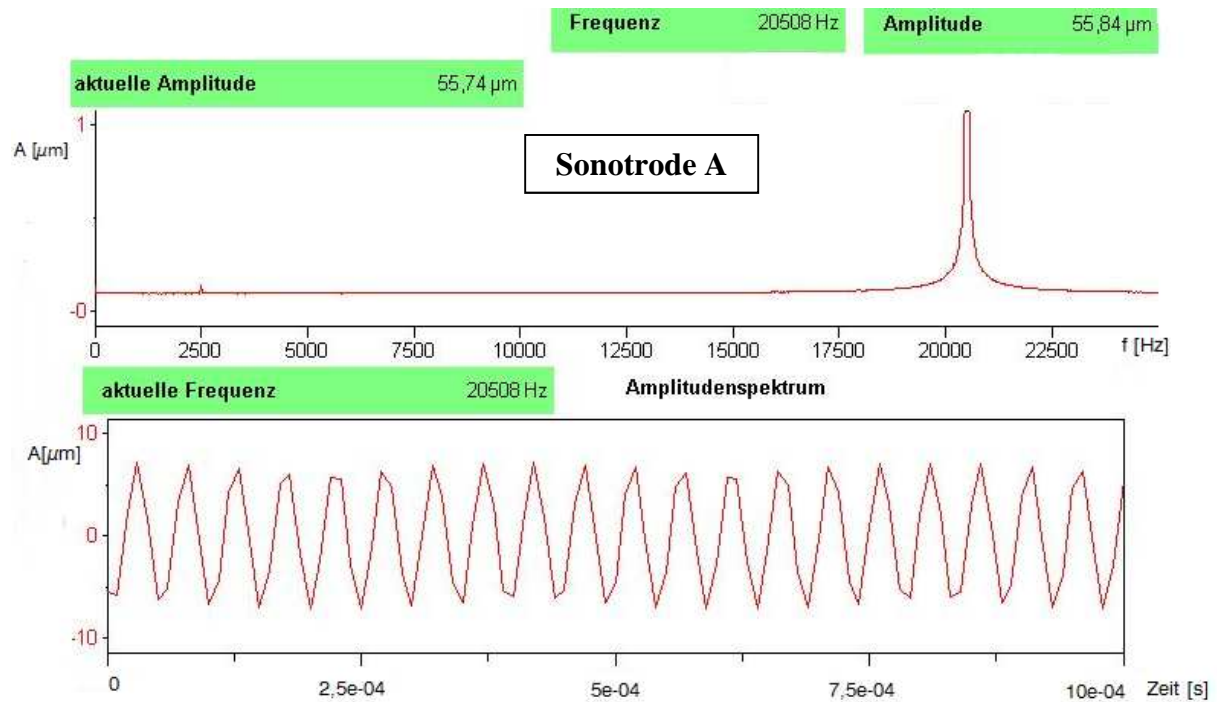


Abbildung 4.20: Ergebnisse der Einmessung von Sonotrode A

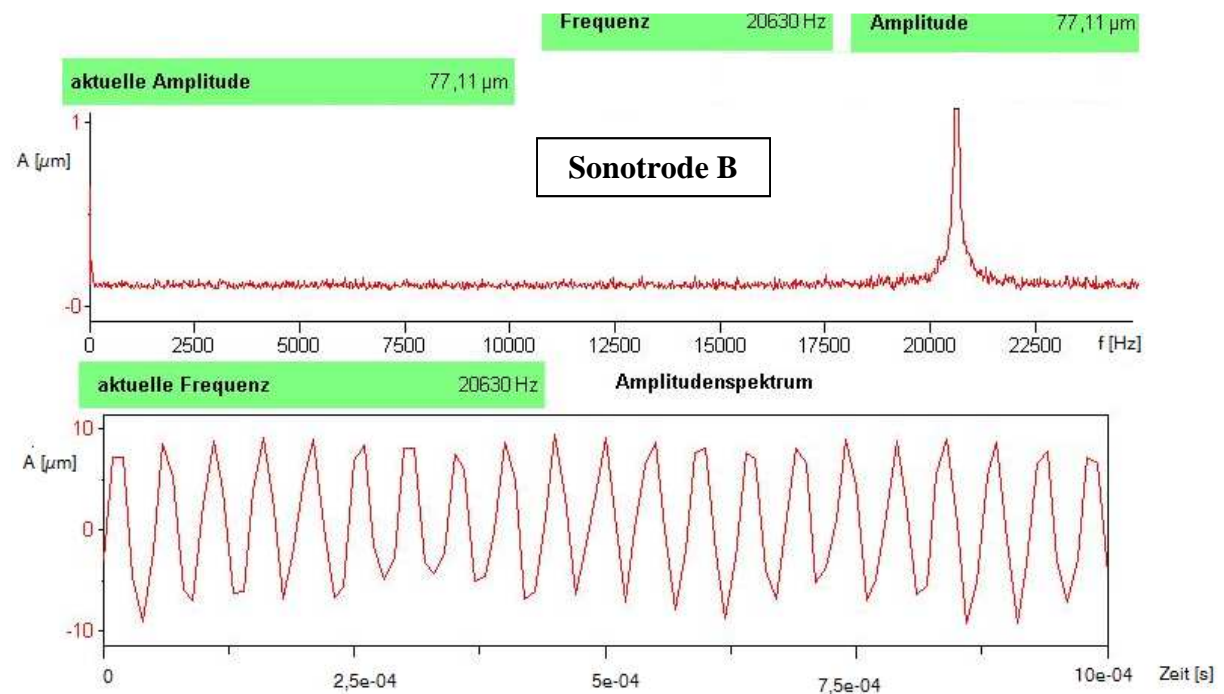


Abbildung 4.21: Ergebnisse der Einmessung von Sonotrode B

Aus den Abbildung 4.20 - 4.22 lassen sich die Amplitudenspektrum, Frequenzverlauf und Resonanzfrequenz der Sonotroden in voller Länge erkennen. Bei der Sonotrode A mit einer

4. Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

Fügefläche von $\varnothing 14$ mm wurde ein Mittelwert der Amplituden bei einer Leerlaufleistung des Generators von $77 \mu\text{m}$ ($\lambda/2 = 38,5 \mu\text{m}$) ermittelt. Die gemessene Frequenz von $20,5 \text{ kHz}$ entspricht mit geringer Abweichung der realen Generatorfrequenz. Grundsätzlich gilt bei Sonotroden, dass die Amplitude vom Durchmesser Verhältnis und die Frequenz von der Gesamtlänge abhängig ist. Diese Aussage lässt sich durch Betrachtung der Ergebnisse der zweiten Sonotrode bestätigen. Bei Vergrößerung der Fügefläche von Sonotrode B um 2 mm wurde bei der gleichen Frequenz eine Verkleinerung der Amplitude auf $\lambda/2 = 28,5 \mu\text{m}$ festgestellt.

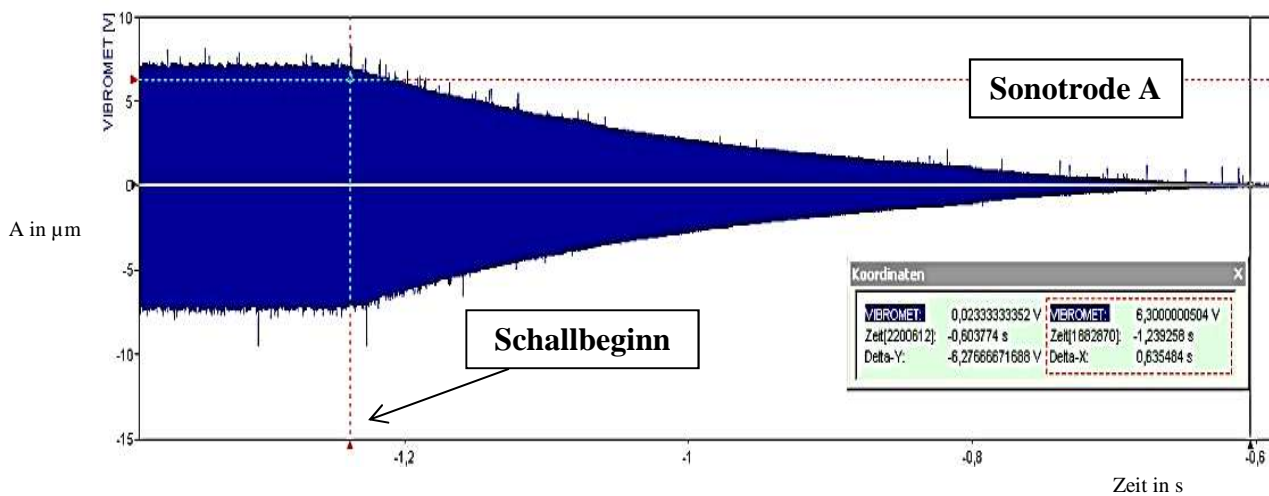


Abbildung 4.22: Amplitudenspektrum über der Zeit mittels YOGAWA Scope Corder DL750

Die Einmessungprüfung war die aussagekräftigste bezüglich der Sonotroden-Geometrie, da diese alle realen Faktoren wie Generatorleistung, Konverterdaten und Transformationsverhältnis des Boosters sowie die Amplitude berücksichtigt. Aus diesem Grund wurden die Sonotrodenlänge und der -Durchmesser nicht mehr von den berechneten Werte auf die DVS 2216-5 Vorgaben geändert.

Bei der Auswahl der Amplitude als Einflussgröße bei dem bisher untersuchten Verbund bestand die Möglichkeit, ein weites Spektrum zu untersuchen, jedoch durch Betrachtung des Verbundmaterials konnte der Amplituden-Bereich kleiner eingeschränkt werden. Aus der Erfahrung mit Kunststoffen wurde festgestellt, dass durch eine kleine Amplitude plastische Deformation, zu wenig Dämpfung und wenig Materialschmelze entsteht. Darum war bei teilkristallinen Kunststoffen wie PA und POM eine Amplitude zwischen $40 - 45 \mu\text{m}$ notwendig [NN14⁺]. Im Fall von Compounds aus Metall und hochgefüllten Graphit wurde bei der Auslegung davon ausgegangen, dass die höheren Schmelzpunkte von Metall und Graphit mehr Wärme in der Fügezone erfordern als Kunststoffe. Aus diesem Grund wurden die Amplitude λ der beiden Sonotroden jeweils mit $28,5 \mu\text{m}$ und $38,5 \mu\text{m}$ ausgewählt. Gleichzeitig wurde der obere Fügepartner (Metallnetz) als „Verlängerung“ der Sonotrode

betrachtet und angenommen, dass die Sonotrode während der Schweißzeit nicht von der Oberfläche abhebt. Diese Vermutung ließ sich während der Untersuchung bestätigen, insbesondere durch erfolgreiche Schweißung des Verbundes.

4.3. Statistische Versuchsplanung

Die statistische Versuchsplanung hat sich seit vielen Jahren bei der Durchführung von schweißtechnischen Versuchen zur Standard-Optimierungsmethode etabliert. Ihre Hauptaufgabe ist die Zusammenhangsermittlung zwischen Einflussparameter und erreichten Zielgrößen [Pet91]. So lassen sich Wechselwirkungen verschiedener Einflussparameter intentional auf ein bestimmtes Phänomen untersuchen (Abbildung 4.23). Die Zahl der durchzuführenden Untersuchungen wird drastisch reduziert im Vergleich zu einer rein empirischen Untersuchungsreihe („One-Factor-at-one-time“ beziehungsweise Ein-Faktor-Methode) [Ba109]. Trotz dieser Einsparung wird ein hoher Untersuchungsgrad erreicht und jedes Ergebnis kann mehrmals benutzt werden [Kle11]. Wichtig ist vor Beginn des Versuches die Ausgangssituation bezüglich Ziel und Gegebenheiten zu analysieren. Nach Definition aller Einflussgrößen und der zur Verfügung stehenden Versuchsressourcen wird ein Lastenheft zur Dokumentation der zu erreichenden Ziele erstellt [Ort15]. Dies führt zur näheren Zeit-Kosten-Abschätzung und besseren Übertragung der Ergebnisse auf den Optimierungsprozess und zukünftige Entwicklungen.



Abbildung 4.23: Schematische Darstellung eines Versuchsplans [NN15⁺⁺⁺]

So wird eine gleichmäßige Streuung der Zielgrößen ausgehend vom Zentralpunkt sowie eine gleichberechtigte Inter- und Extrapolation für die Zielgröße aller Einflussgrößen realisierbar [NN15⁺⁺⁺]. Dazu besteht bei bisher unbekannten Untersuchungen mit vielen Faktoren die Gefahr, dass die Signifikanz der Einflussparameter nur schwer ersichtlich ist. Dies sollte in

einem Screening-Versuchsplan auf Relevanz und Einfluss bezogen auf die Zielgröße klassifiziert werden [Fr102].

Die 2^m -vollständigen Versuchspläne (Abbildung 4.24) im Bereich schweißtechnischer Untersuchungen haben Vorteile bezüglich der Anzahl der Teilversuche gegenüber Wirkungsflächenplänen zum Beispiel zentral zusammengesetzter Pläne mit ebenfalls linearer Abstufung der einzelnen Einflussfaktoren.

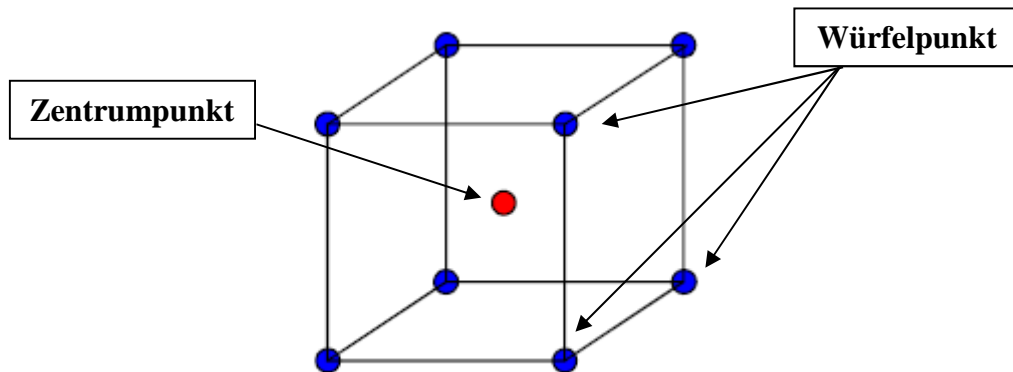


Abbildung 4.24: Graphische Darstellung eines 2^3 -vollständigen Versuchsplans

Da bei den folgenden Untersuchungen drei Faktoren mit jeweils zwei Stufen je Faktor untersucht werden, wird das laut erstellte Faktorplan mit 12 Experimenten durchgeführt.

Mit dieser Form besitzt der Plan eine Auflösung V^+ und einen Fehlerfreiheitsgrad $FG = 1$. Darum wurden bei jedem der folgenden Versuchspläne vier Zentrumspunkte hinzugefügt und somit der auf $FG = 5$ erhöht. Die Zentrumspunkte stellen einen Teilversuch dar, der im Mittelpunkt der oberen und unteren Stufe des jeweiligen Faktors liegt.

Die FG sind notwendig, um einen Überblick über den Versuchsfehler bezogen auf Haupteffekte, Wechselwirkungen zweiter Ordnung und quadratische Effekte, die vor einer Wiederholung oder dem Einfügen von Zentrumspunkte geschehen, zu schaffen. Üblicherweise sollte ein Versuchsplan mindestens drei FG besitzen. Durch eine Auflösung $> V$ ist eine unkritische Schätzung von dreifachen Wechselwirkungen möglich [Stat15]. Diese sind aber in der Praxis irrelevant [Kle11].

5. Bewertungsverfahren der hergestellten Verbunde

5.1. Scherzugversuch

Der Scherzugversuch ist eine bei ultraschallgeschweißten Verbunden bevorzugte mechanische Prüfung zum Vergleichen von erzielten Festigkeitsgrößen. Neben schneller und kurzer Ablaufzeit liefert diese Methode einen genauen Festigkeitswert bezogen auf die Fügefläche. Wie erwähnt sind bei dieser Untersuchung die Kopplungsflächen gleich den Sonotrodenflächen (154 und 201 mm^2) und somit kleiner als die Fügepartner-Gesamtfläche (900 mm^2). Diese Tatsache führt bei einer Zugbelastung zu erhöhter Kerbwirkung am Übergang zur Fügezone. Da es sich hier um einseitig überlagerte Fügepartner handelt, ist ein günstiger Kraftfluss bei einer Scherzugkraft zu erwarten. Bei dieser Prüfung und einer konstruktiv günstig ausgewählten Fügezone lassen sich alle ermittelten Scherzugkraftwerte auf die verwendete Fläche der Fügezone beziehen [Krü05, Bal09].

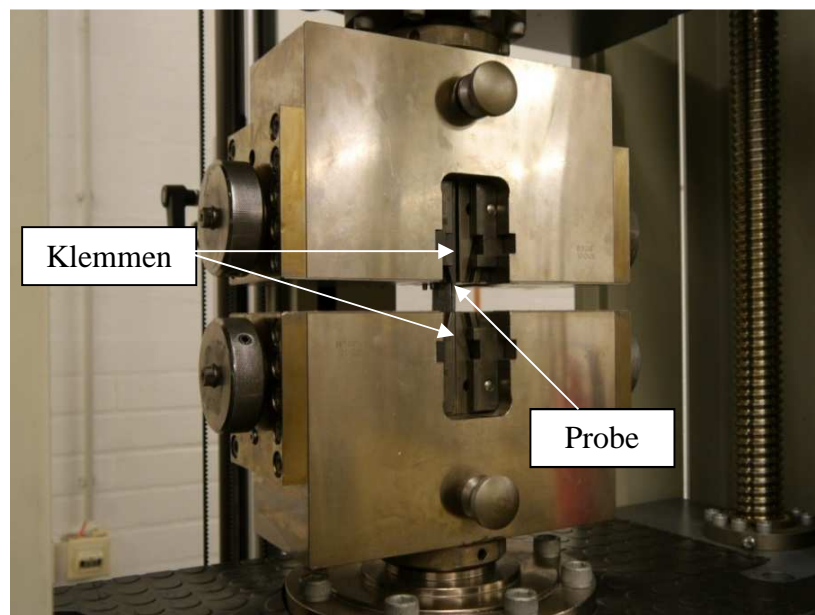


Abbildung 5.1: Zugscherversuch der Graphit-Compound/Metall-Verbunde

Die Scherzuguntersuchungen der verwendeten Probenform laut Kapitel 4.2.6 und wurden in Anlehnung an DIN EN 1465 durchgeführt. Es wurde eine universale Prüfmaschine vom Typ Zwick/Roell DL100 eingesetzt (Abbildung 5.1). Die metallischen und graphithaltigen Fügepartner wurden jeweils an die obere und untere Klemme gehalten. Die gerändelten Oberflächen an der Inneneseite der Klemmen hat eine vorzeitige Rutscherscheinungen, insbesondere an die Netzseite verhindert. Damit war der Einsatz zusätzlicher Einspannvorrichtungen nicht nötig.

5.2. In-Plane elektrische Widerstandsmessung

Die Widerstandsmessung stellte ebenfalls bei dieser Arbeit ein entscheidendes Kriterium dar. Letztendlich war die Verbesserung der mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Compounds durch eine stoffschlüssige Verbindung mit Metallen das Hauptziel. Dieses wurde nach dem Prinzip der Vierpunkt-Widerstandsmessmethode unter Berücksichtigung der Geometrie der Fügezone und mechanischer Druckbelastung realisiert. Dafür wurde eine am Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik der TU Clausthal spezielle Vorrichtung entwickelt (Abbildung 5.2). Mit dieser Vorrichtung konnte beim Anziehen der M12-Schraubverbindung eine konstante Federkraft und somit ein reproduzierbarer Druck in der Fügezone eingestellt werden. Durch Messung des zurückgelegten Weges (Δ) der Feder wird über die Federkonstante die Soll-Kraft erreicht. Die Schweißprobe liegt in einer Kupferplatte mit den Abmessungen 30 x 30 mm. Auf der Fügezone liegt ein Bolzen mit der gleichen Geometrie wie die Sonotroden-Spitze.

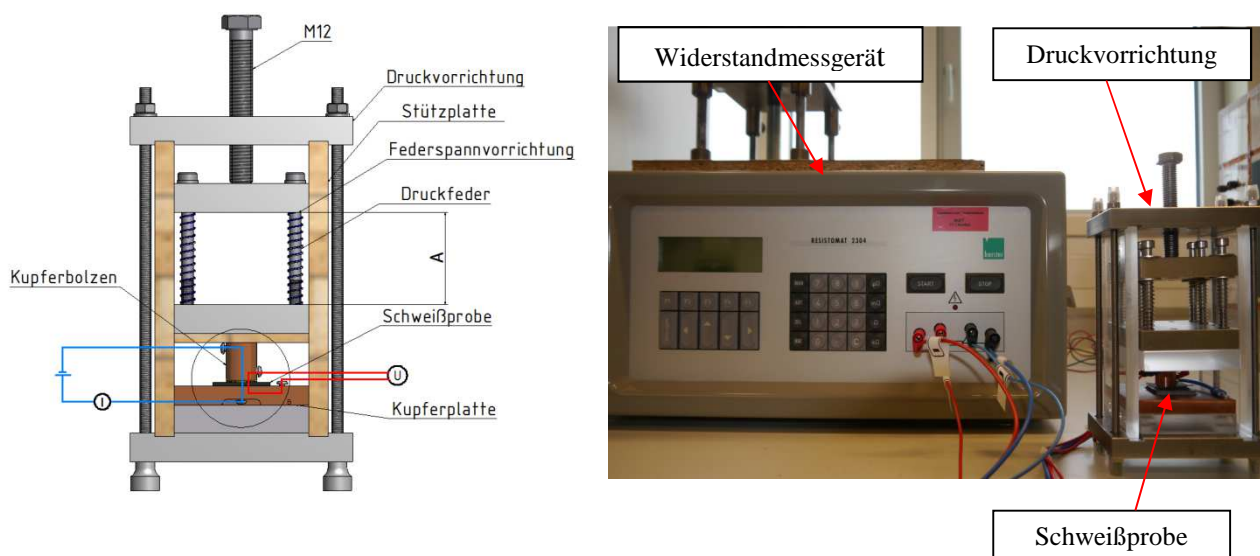


Abbildung 5.2: Schematische und reale Darstellung der In-plane-Widerstandsmessung

Bei der Federspannvorrichtung (Abbildung 5.2) wurden acht Federn mit einer Federkonstante von $c_f = 0,432 \text{ N/mm}$ und einer Federlänge von $L_0 = 48 \text{ mm}$ mit einer Blocklänge von 12,5 mm eingesetzt. Die Ober- und Unterplatte dieser Vorrichtung wurde mit acht M6 x 70-Schrauben verbunden. Die Druckfedern sind auf diesen Schrauben aufgesetzt. Die Proben wurden bei vordefinierten Kräften bezogen auf den zurückgelegten Federweg berechnet.

Als Widerstandsmessgerät wurde ein Resistomat vom Typ 2304 der Firma Burstel eingesetzt. Die Strom- und Spannungszufuhr erfolgte über am Bolzen angeschraubte Kabel. Während die Spannung an der Kupferplatte abgegriffen wird, wird der zweite Strom ebenfalls an der

Platte an einer gefrästen Ausführung direkt unter der Schweißplatte zugeführt. Somit wird ein orthogonaler Stromdurchgang vom Bolzen über die Fügezone direkt in der Kupferplatte erreicht (Abbildung 5.3).

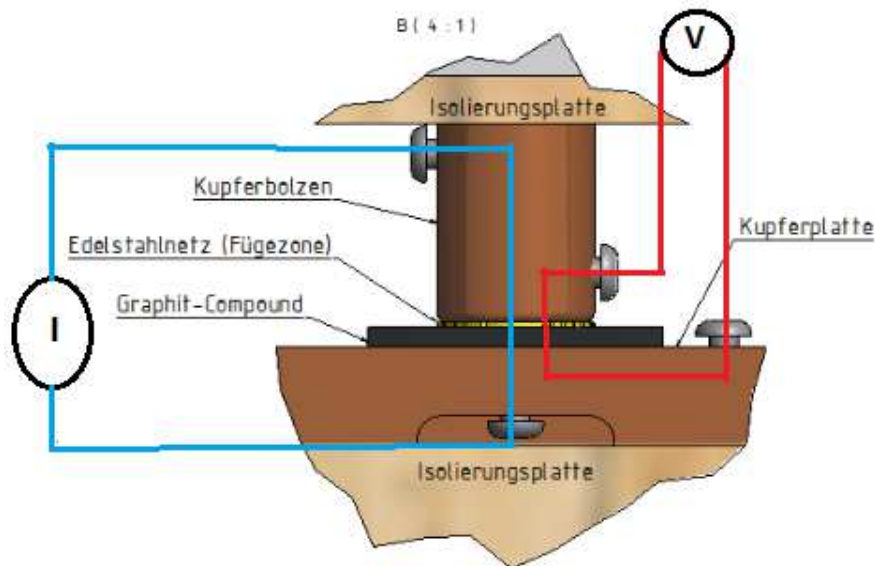


Abbildung 5.3: Ablauf der elektrischen Widerstandsmessung in der Fügezone

In Tabelle 5.1 und 5.2 ist die Abhängigkeit zwischen zurückgelegtem Federweg und dem gesamten Druck bei der Druckfedervorrichtung dargestellt. Die Drücke, bei denen der elektrische Widerstand gemessen wurde, sind in grüner Farbe markiert.

Masse der Vorrichtung in kg	1,2
Fläche A in mm ²	154
Gewichtskraft der Federspannvorrichtung in N	11,77
Federkonstante in N/mm	0,43

Tabelle 5.1: Ermittelte Gewichtskraft der Federspannvorrichtung

Federweg in mm	Einzel- Federkraft in N	Gesamt- Federkraft in N	Gesamtkraft in N	Gesamtdruck in N/mm ²	Gesamtdruck in bar
1	0,43	3,46	15,23	0,1	0,99
6	2,59	20,74	32,51	0,2	2,11
10	4,32	34,56	46,33	0,3	3,01
15	6,48	51,84	63,61	0,4	4,13
19	8,21	65,66	77,44	0,5	5,03
23	9,94	79,49	91,26	0,6	5,93
28	12,1	96,77	108,54	0,7	7,05

Tabelle 5.2: Abhängigkeit zwischen Federweg und Gesamtdruck bei der Federdruckvorrichtung

5.3. Thermische Analyse

Zur thermischen Charakterisierung der Versuchswerkstoffe und der hergestellten Verbunde wurde eine materialabhängige Temperaturleitfähigkeitsmessung durchgeführt. Dadurch kann die Reaktionsempfindlichkeit bei einer Temperaturänderung bestimmt werden. Zuvor wurde die spezifische Wärme von einer geschweißten Proben durch ein Differenzialkalorimeter (DSC) mit einer periodischen Temperatur-Modulation von $\pm 0,48 \text{ °C}$ alle 60 s ermittelt. Nach Bestimmung der Dichte ergibt sich die thermische Leitfähigkeit aus Multiplikation der drei Größen miteinander. Da es sich in dieser Arbeit hauptsächlich um grundlegende Untersuchungen zum späteren Einsatz bei NT-PEM-Brennstoffzellen handelt und diese im Arbeitstemperaturbereich zwischen 60 und 70 °C liegen [Kan12⁺], wurde bei allen Proben die thermische Leitfähigkeit im Bereich 60 - 80 °C ermittelt.

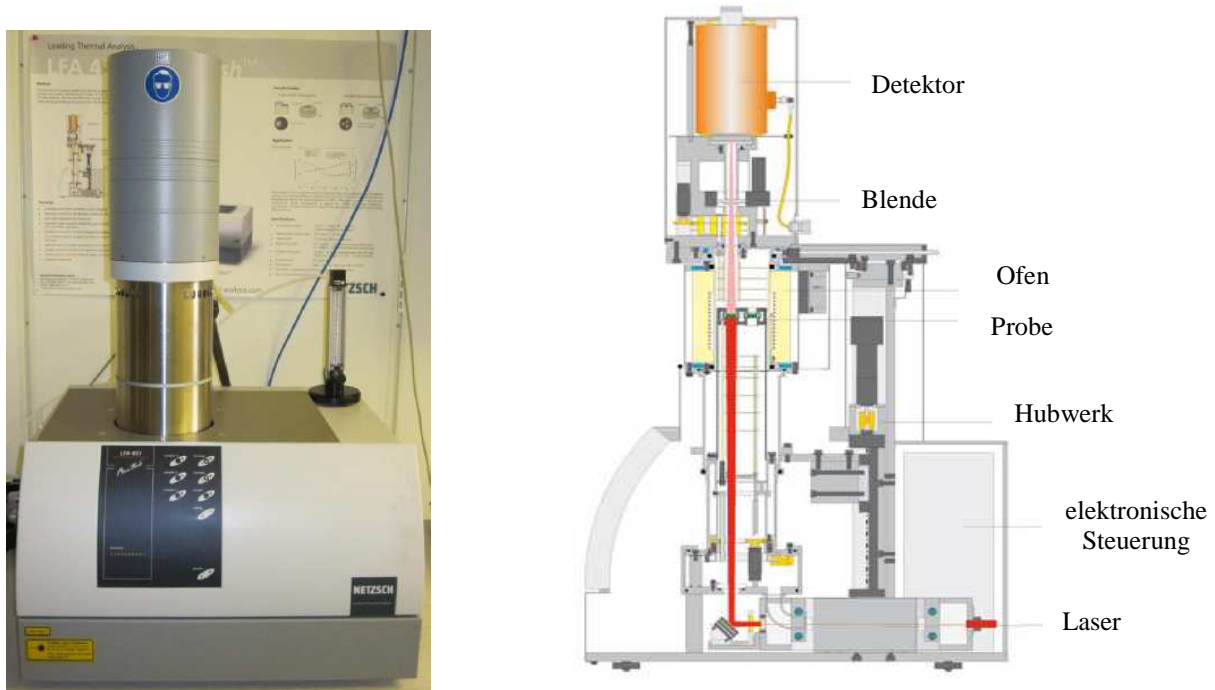


Abbildung 5.4: Verwendete LFA-457-Anlage für die thermische Analyse [Osl15]

Diese Analysen wurden mittels der Laser-Flash-Apparatur LFA 457 MicroFlash® der Firma Netzsch durchgeführt (Abbildung 5.4). Durch ein mathematisches Modell des zeitabhängigen Temperaturverlaufs lässt sich die Temperaturleitfähigkeit unter adiabatischen Bedingungen wie folgt errechnen [Nei15, Nei15⁺]:

$$\Delta = 0,1388 * \frac{s^2}{t_{0,5}} \quad (5.1)$$

Anschließend errechnet sich die thermische Leitfähigkeit wie folgt:

$$\kappa(T) = c(T) * \rho(T) * \Delta(T) \quad (5.2)$$

6. Experimentelle Voruntersuchungen

6.1. Herstellung von Graphit-Compound/Nickel-Verbunden

Aufgrund der ansteigenden Verwendung von Graphit als Bestandteil der Bipolarplatte im Brennstoffzellenbereich besteht das Bedürfnis zur wirtschaftlichen Herstellung von Hybridbauteilen mit Graphit-Compounds als Fügepartner. Die Voruntersuchungen dienten an erster Stelle als Vorstufe zur Erprobung der Prozess- und Werkstoffeinflussfaktoren gemäß Abbildung 2.2. Mit dem Abschluss der Voruntersuchungen sollte eine möglichst genaue Erkenntnis über das Schweißverhalten des Graphit-Compounds und dem Prozess-Parameterbereich gewonnen werden. Die Vorgehensweise dabei ist in drei Phasen unterteilt. Jede neue Phase setzte die Fortschritte aus der vorherigen Phase fort. Die systematische Vorgehensweise dabei ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Da es in all diesen Phasen noch nicht um die Qualifizierung der Verbindung durch mechanische Untersuchungen geht, sondern um Machbarkeit und Parameterfindung, wurden der größte Teil der hergestellten Verbunde lediglich metallografisch untersucht. Sobald zwei Fügepartner mechanisch stabil miteinander verbunden waren, ohne erkennbaren Eintritt von Rissen oder Brüchen, wurde ein Schliff quer zur Fügezone gemacht und die Bindungsstruktur angeschaut.

Die Phase I beginnt mit dem US-Schweißen einer Graphit-Compound-Platte aus PPG86 mit einer PP Platte. Es wurde bewusst PP ausgewählt, damit homogene Verbindungen aus gleichartigen Thermoplasten vorliegen. Ziel ist zum einen, die elektrisch leitenden Graphit-Compounds auf einer Seite zu isolieren, zum anderen Erkenntnisse über Schweißfähigkeit solcher Compounds, unter Anwendung hochfrequente longitudinal Welle und somit mögliche Risse oder Brüche, zu gewinnen. In dieser Phase wurden die Proben noch nicht vorgewärmt, sondern der Schweißprozess lief unter Variation der klassischen Einflussfaktoren. Die Schweißzeit wurde ab 0,1 s immer um 0,1s - Schritte erhöht, die Schweißenergie ab 50 J mit 50 J - Schritten und der Schweißdruck ab 30 N, gemäß Steuerungsmöglichkeit der Anlage mit der COSONIC-Steuerung gesteigert. Die Sonotrodengeometrie variierte bei stufenförmiger Sonotrode mit runder Spitze mit Ø 12, 14 und 16 mm. Wobei es bei der Ø12 mm Sonotrode durch die hohen mechanisch-thermischen Effekte in der Mitte des kleinen Durchmessers ab einer 0,1 s Schweißzeit zum Bruch kam. Außerdem schwingte diese Sonotrode mit einer Amplitude von 45 µm, was zur raschen Durchschmelzen der oberen Fügeteile führte.

Darum wurde die Entscheidung getroffen, die Amplitude, sowie die Druckbelastung in der Fügezone zu reduzieren. Hierfür kam eine Sonotrode mit Ø16 mm zum Einsatz.

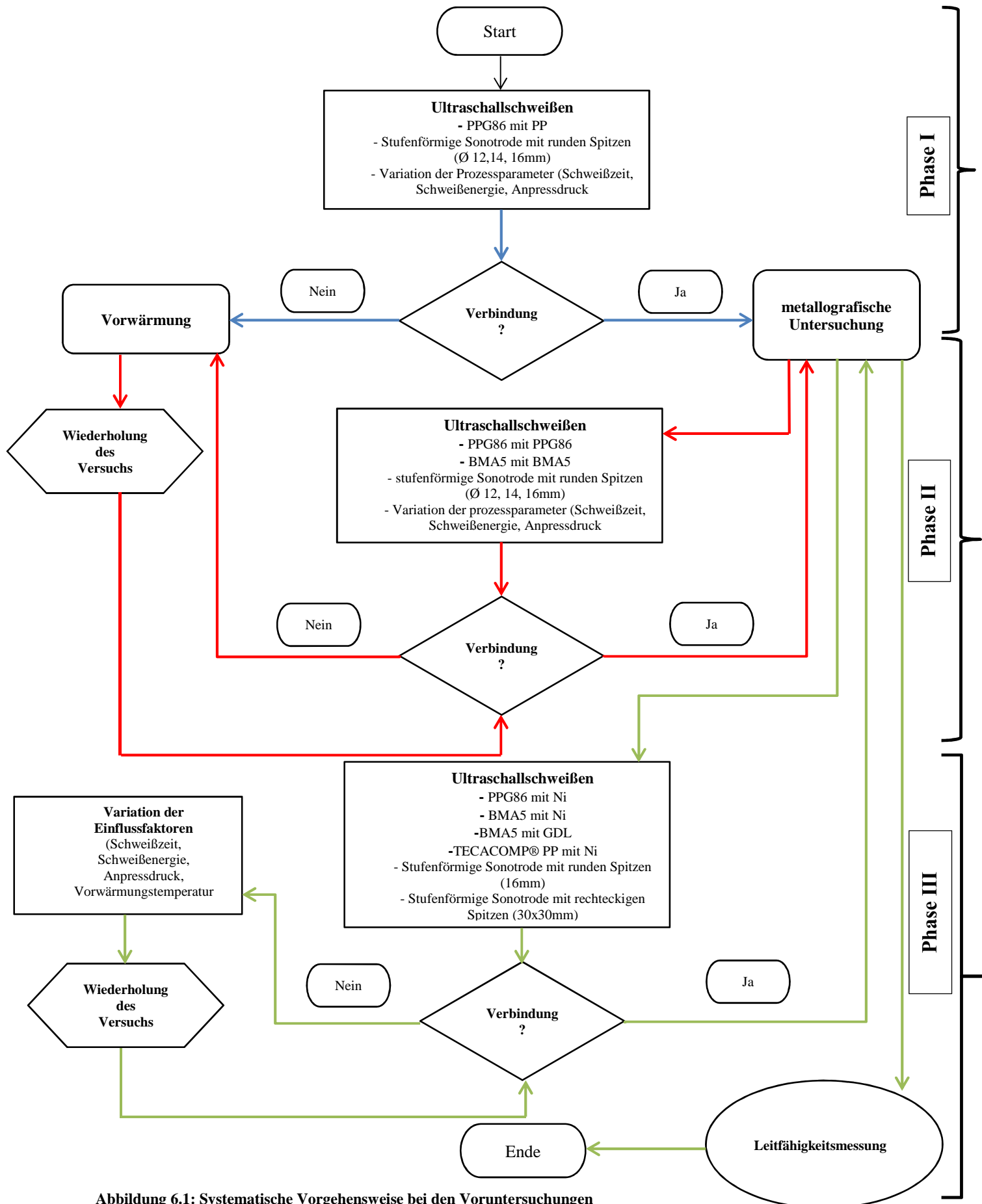


Abbildung 6.1: Systematische Vorgehensweise bei den Voruntersuchungen

Diese Maßnahme war erfolgreich, bei einer Schweißzeit von 0,5 s, einer Schweißenergie von 150 J und einem Schweißdruck 30 N. So konnten die ersten stabilen Verbindung hergestellt werden, gleichzeitig traten keine Risse an der PPG86 Platte auf.

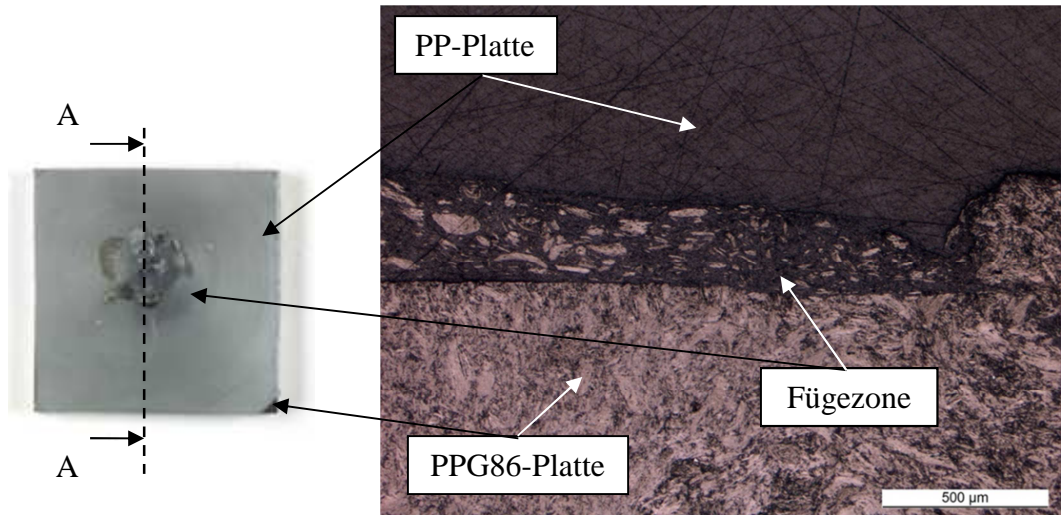


Abbildung 6.2: Ultraschallschweißen einer PP-Platte PPG86-Graphit-Compound mit Schliffbild der Fügezone (A-A) mit Sonotrode A

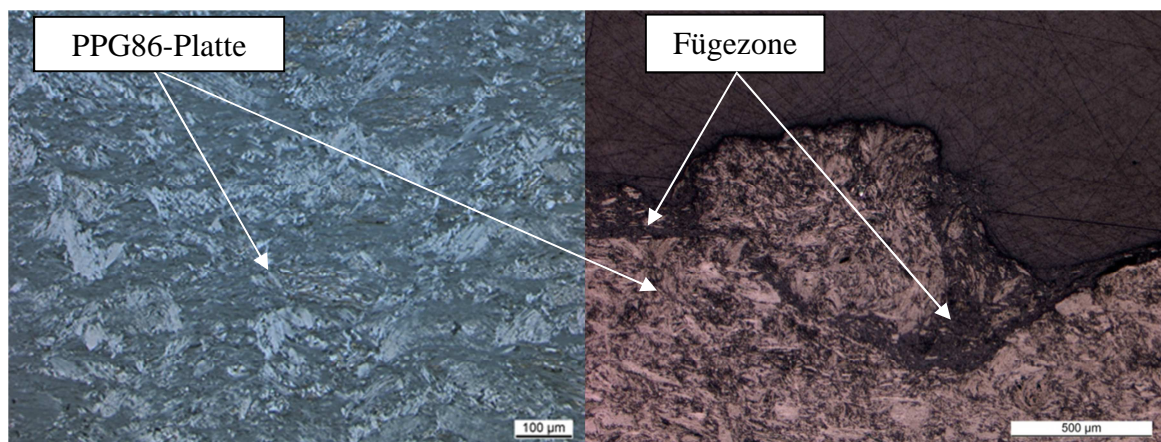


Abbildung 6.3: Schliffbild der Fügezone (A-A) nach dem Ultraschallschweißen einer PP-Platte mit PPG86-Graphit Compound mittels Sonotrode A

Die Fügezone der PP-Platte mit dem PPG86-Graphit-Compound wurde in Ansicht A-A als Querschliffen (Abbildung 6.2 - 6.3). Die Durchmischung von Graphit und der Thermoplaste ist deutlich zu erkennen. Gleichzeitig ist aufgrund der Ultraschallschwingung eine Aufhebung des Graphit-Compounds in der Fügezone (Abbildung 6.3) und dessen Eindringen in den oberen Fügepartner zu sehen.

Dieser Erfolg, eine minimale Schmelzebildung zu erzeugen bei graphithaltigen Compounds hat zur weiteren vertieften Betrachtung der Zusammenhänge von Proben temperatur vor und während des Ultraschallprozess geführt. Wie schon erwähnt ist Proben vorwärmung bei

diversen Compoundherstellungen angewendet worden. Hier muss allerdings noch die Materialsprödigkeit in Betracht gezogen werden.

Nach Abschluss dieser Phase konnte man die erste Erkenntnis bezüglich Schweißparameter (Amplitude, Schweißzeit, Anpressdruck, Vorwärmungstemperatur) gewinnen. Die Phase II begann mit weiteren Untersuchungen zum Verschweißen von zwei PPG8-Platten (30 x 30 x 1,5 mm). Mit Beginn dieser Phase II wurde das Thema Vorwärmung intensiver verfolgt. Eine externe Temperaturerhöhung der Proben führt mikroskopisch gesehen zu höheren Durchmischungsraten zwischen der PPG86 und PP-Platte. Die Güte der Verbindung wurde zunächst durch die Dicke der Schweißzone bzw. die Messung der Fügewege mittels Auflichtmikroskop bei metallografischen Untersuchungen bestimmt. Die ersten Untersuchungen zweier PPG86-Platten miteinander in dieser Phase, auch bei steigender Variation der Einflussfaktoren, waren nicht erfolgreich.

In Abbildung 6.4 ist ein Längsriss, ausgehend von der Sonotroden-Druckstelle zu sehen. Bei diversen Änderungen der Schweißparameter (insbesondere durch Reduzierung der Anpresskraft auf 30 N) sind keine Risse entstanden, es hat ebenfalls allerdings auch keine Schmelzebildung stattgefunden.

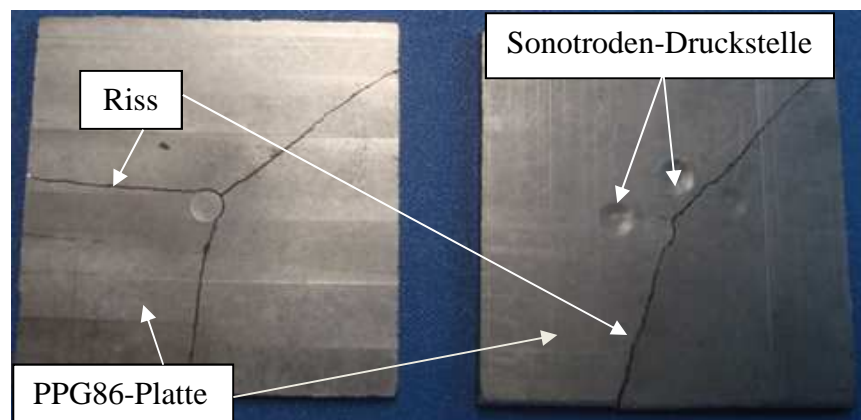


Abbildung 6.4: Rissbildung an einer PPG86-Platte

An dieser Stelle und bei den späteren Untersuchungen wurde die Vorwärmung immer als zusätzlicher Einflussparameter betrachtet. Dabei wurden die DSC-DMA Ergebnisse betrachtet, sodass die eingestellte Vorwärmungstemperatur in der Nähe von T_G liegt. Die Auswahl hängt von anderen Faktoren wie der Schweißzeit und der Amplitude ab. So ist bei Auswahl höherer Amplituden und Schweißenergien die Vorwärmungstemperatur zu reduzieren und umgekehrt. Auch in dieser Phase wurde je nach Probendicke ausschließlich runde Sonotroden spitzen $\varnothing 14$ und 16 mm verwendet. Bei Verwendung von Sonotrode A ($\varnothing 16$ mm) und einer Probentemperatur von 40°C , einer Schweißzeit t_s von $0,6$ s und einer

Anpresskraft von 200 N wurde eine feste Verbindung erreicht. Durch die hohen Kerbkräfte am Übergang der Fügezone ist bei Kraftanwendung zur Trennung der beiden Platten der obere Fügepartner an der Grenze zur Sonotroden-Druckstelle gerissen und das Material in der Fügezone festgeblieben (Abbildung 6.5). Aus diesem Grund musste später bei allen Schweißungen die Sonotroden spitze mit einem Radius von 1 mm versehen werden.

Auch in Phase II wurden ausschließlich nur metallografische Untersuchungen der Fügezone zur Beurteilung der Verbindungsgüte durchgeführt. Bei den erstellten Schliffbildern ist eine Fügeebene links und rechts der Fügezone durch eine Linie zwischen den beiden Werkstoffen zu erkennen.

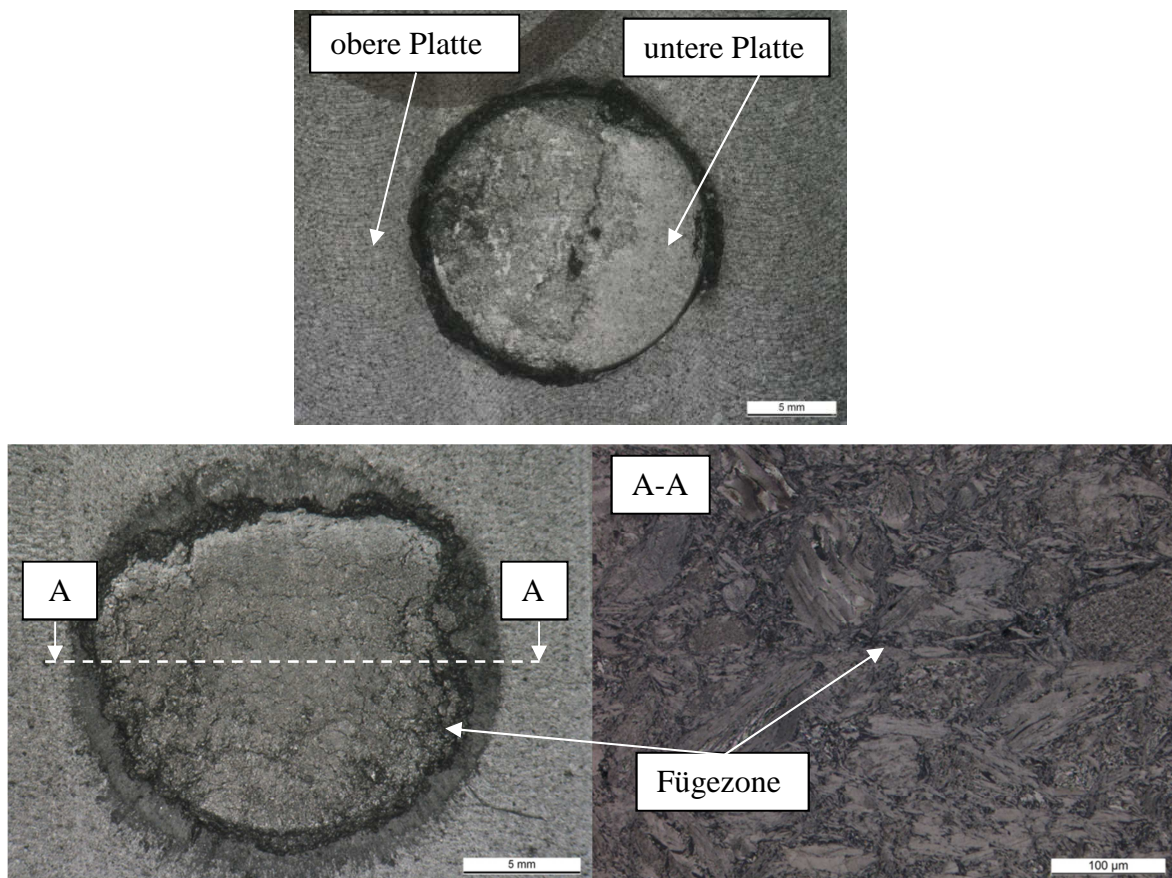


Abbildung 6.5: Schliffbild der Fügezone (A-A) von PP-Platte mit PPG86-Graphit-Compound, Sonotrode A

Bei der Phase III handelt es sich zusätzlich um eine Verbindung von unbeschichteten sowie vergoldeten Ni-Netzen mit PPG86 sowie BM5-Platten. Während bisher bei PPG86-Ni Verbindung ausschließlich Sonotrode A laut Kapitel 4.2.6 eingesetzt wurde, wurden bei diesem Schritt eine neu entwickelte Sonotrode mit der gleichen Länge wie Sonotrode A und einer Fügefläche von 12 mm verwendet. An die Sonotrode wurde eine Spitze mit 30 x 30 mm mittels M10-Gewinde angeschraubt (Abbildung 6.6). Bei der Einmessung der beiden Sonotroden wurde eine große Abweichung der Amplitudenbereiche festgestellt. Die 30 x 30

mm Spitze führte zur massiven Dämpfung des Schwingungsfrequenz. Diese hat mit einer Amplitude von ca. $5\text{ }\mu\text{m}$ in der Mitte und ca. $30\text{ }\mu\text{m}$ an der rechteckigen Kante geschwungen. Dazu war aufgrund der Wärmeleitung bemerkbar, dass sich nach fünf Schweißungen die Sonotrodentemperatur an der Spitze um $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht, was auch zu einer Benachteiligung des Schwingungsverhaltens und somit die Reproduzierbarkeit bei gleichen Parametern beeinflusst.

Zu Beginn dieser Phase wurde ausschließlich die Sonotrode A ($\varnothing 16\text{ mm}$) eingesetzt. Trotz systematischer Erhöhung der Schweißzeit um $0,1\text{ s}$ und der Schweißenergie um 50 J Schritte ist keine Verbindung zwischen PPG86 und Ni zu Stande gekommen.

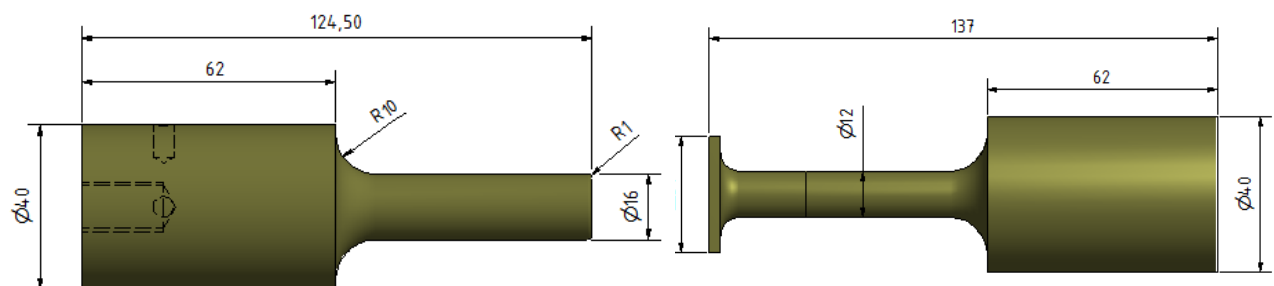


Abbildung 6.6: CAD Modell der verwendeten Sonotroden

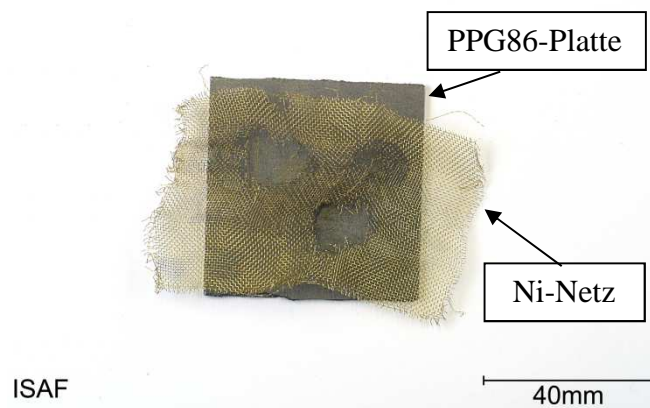


Abbildung 6.7: Ultraschallschweißen einer PPG86-Platte mit Ni-Netz ohne Vorwärmung

Ebenfalls hat die Oberflächenrauheit von $R_a = 39\text{ }\mu\text{m}$ des Netzes (gemessen durch 3D Multifokus-Rekonstruktion) nicht zur ausreichender Erzeugung von Reibungskräften durch die Wärmeleitung zwischen den beiden Fügepartnern beigetragen. Somit war die PPG86-Platte noch nicht weich genug. Durch in Phase II ergriffene Maßnahme zu Abrundung der Sonotrodenspitze mit 1 mm Radius konnte ein Bruch der PPG86-Platte verhindert werden. Nach Aufschlagen der Sonotrode mit $t_s = 0,5\text{ s}$ und $E = 500\text{ J}$ ist jedoch das Netz aufgrund der hohen Reibungskräfte an der Fügezone zerrissen (Abbildung 6.7). Durch effektiven Einsatz der Vorwärmung gemäß Abbildung 4.3 und zahlreichen Variation dieser Schweißparameter

konnte eine Verbindung zwischen PPG86, BMA5 und Nickel hergestellt werden. Die Prozessparameter für beiden Sonotroden sind in Tabelle 6.1 aufgelistet.

Material	PPG 86	BMA5
Fügezone in mm	Ø 16	30 x 30 x 30
Sonotroden-Amplitude in μm	28,5	5 (Mittelpunkt)
Sonotroden-Frequenz in Hz	19,486	18,316
Schweißzeit t_s in s	0,7	4
Haltezeit t_h in s	0,5	3,5
Schweißenergie E in J	30	2000
Anpresskraft P in N	70	2000
Vorwärmungstemperatur T (Amboss) in $^{\circ}\text{C}$	65	110

Tabelle 6.1: Verwendete Schweißparameter

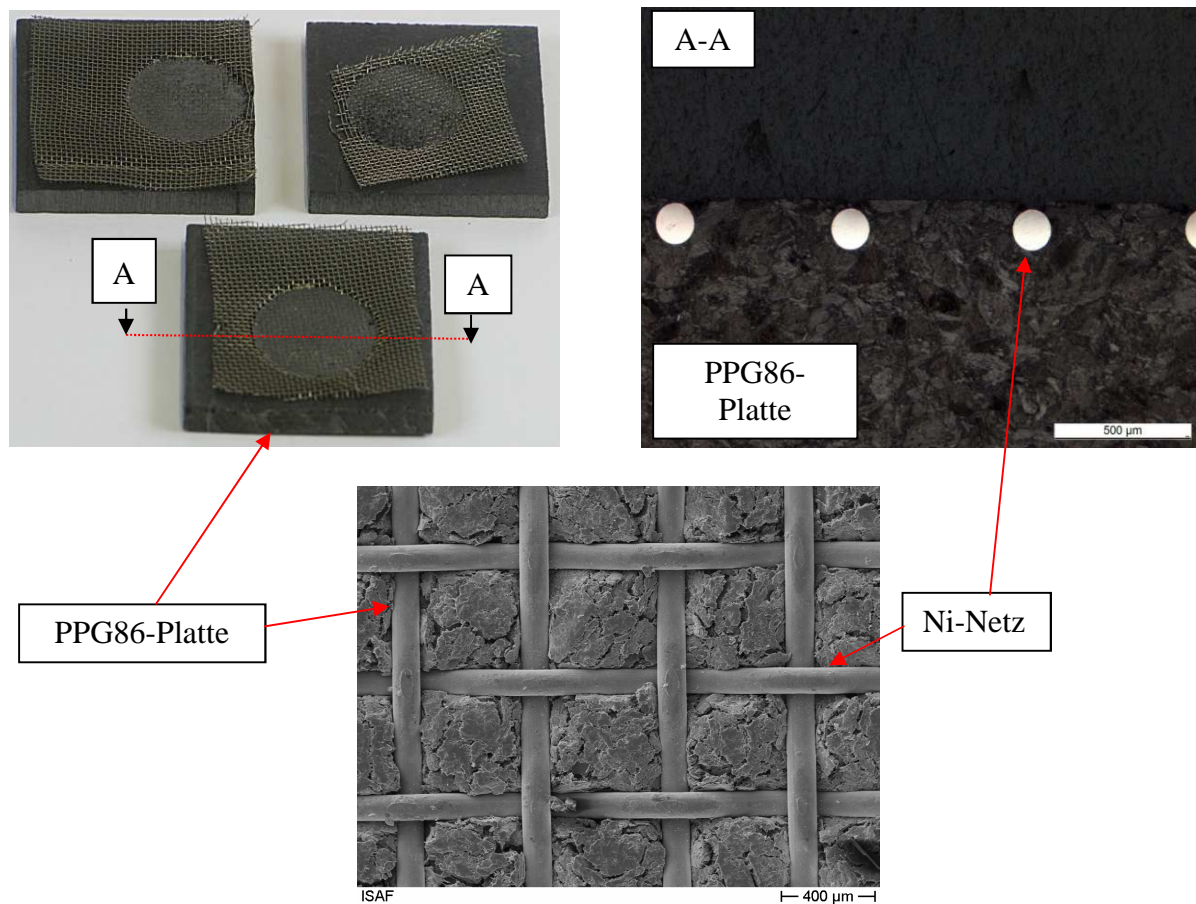


Abbildung 6.8: Schlichtbild und REM-Aufnahme der Fügezone einer Ultraschallschweißung einer PPG86-Platte mit einem Ni-Netz unter Vorwärmung mit Sonotrode

Bei der REM-Aufnahme (Abbildung 6.8) ist aufgrund der Netzstruktur ein wellenförmiges Eintauchen ohne Rissbildung an der Oberfläche näher dargestellt. An der Drahtkreuzung sind leichte Sonotroden-Druckspuren zu erkennen, aber diese führten nicht zur Formänderung des Drahtes.

Aus der Tabellengrößen (Tabelle 6.1) lässt sich der bemerkenswerte Unterschied der Prozessfaktoren, insbesondere Schweißzeit und Schweißenergie, erkennen. In Abbildung 6.9 sind die metallografischen Untersuchungen der Schweißzone mit einer rechteckigen Sonotrode dargestellt. Zu beachten ist trotz eines höheren Drucks das unvollständige Eindringen des Drahtes in den unteren Fügepartner. Dazu ist bei den beiden Aufnahmen eine beginnende Ablösung des Graphits an der Oberfläche, ohne eine Rissbildung im inneren Gefüge, zu erkennen. Diese Erscheinung ist als Folge der höheren Schweißzeit und Schweißenergie anzusehen.

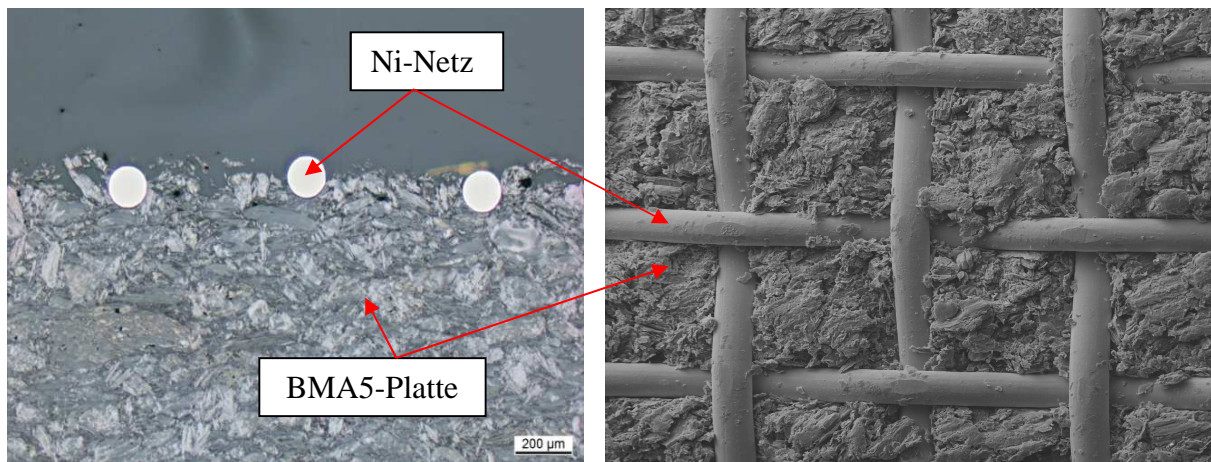


Abbildung 6.9: REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer BMA5-Platte mit einem Ni-Netz mit einer Sonotroden-Fügefläche von 30 x 30 mm bei einer $T_V = 110\text{ °C}$

In Abbildungen 6.9 - 6.11 ist die Fügezone einer BMA5-Platte vor und nach Abschluss des Ultraschallschweißprozesses mit der rechteckigen Sonotrode zu erkennen. Deutliche Druckspuren sind zu sehen, aber trotz hoher Anpresskraft hat ein vollständiges Eintauchen des Netzdrahtes nicht stattgefunden. Man merkt, dass die hohen Schweißparameter (Schweißzeit und Schweißenergie) die Materialien schädigen können. Dies lässt sich nicht vermeiden, insbesondere mit dem vorhandenen Übersetzungsverhältnis des Boosters an den Herfurth Ultraschallschallanlagen, sodass eine Anpassung des Amplitudenprofils nicht möglich ist.

Auch wenn eine Verbindung erreicht wurde, ist die Graphit-Compounds Platte für einen zukünftigen Einsatz nicht mehr belastbar. Aus diesem Grund wurde dieser Sonotrodenform nicht mehr betrachtet und folgende Untersuchungen konzentrieren sich ausschließlich auf runde Sonotrodenspitzen.

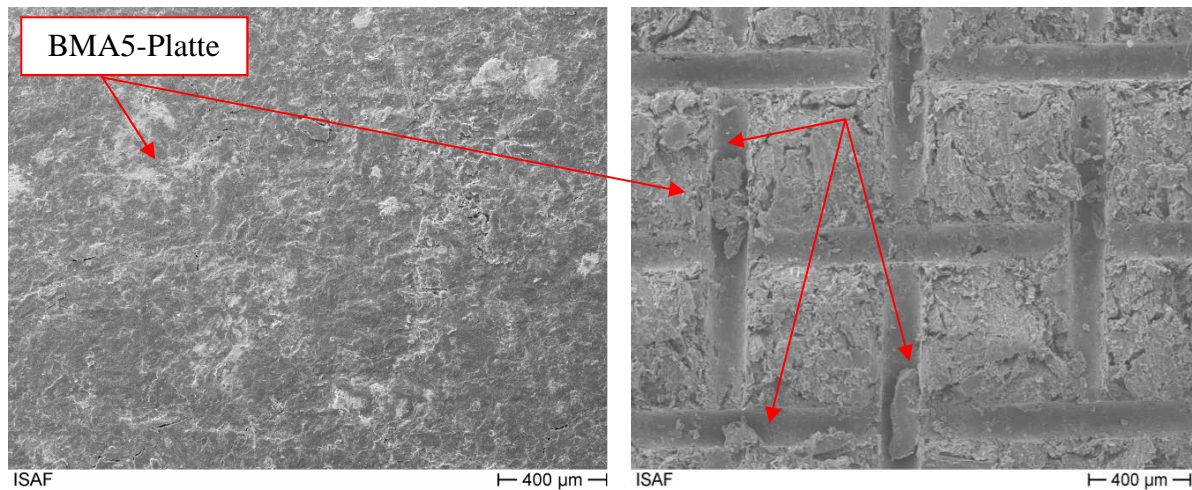


Abbildung 6.10: REM-Aufnahme der Oberfläche einer US-Schweißen BMA5-Platte mit Ni-Netz mit einer 30 x 30 mm Sonotroden Fügefläche bei einer $T_v= 110^{\circ}\text{C}$

In ist ein Teil der Fügezone eines mit Sonotrode A hergestellten Verbundes aus BMA5 und Nickel dargestellt. Materialrisse wurden nicht beobachtet, stattdessen sind die durch Vibration und Materialeindringung abgelösten Graphite markiert. Durch Erhöhung der Vorwärmungstemperatur auf 130°C erhöht sich die Schmelzebildung des PVDF und somit der Fügeweg, sodass ein stärkeres Eintauchen des Ni-Netzes in die BMA5-Platte erkennbar ist. Bei dieser Schweißung wurden keine Risse auf der Oberfläche festgestellt, jedoch an der Stirnseite der Platte.

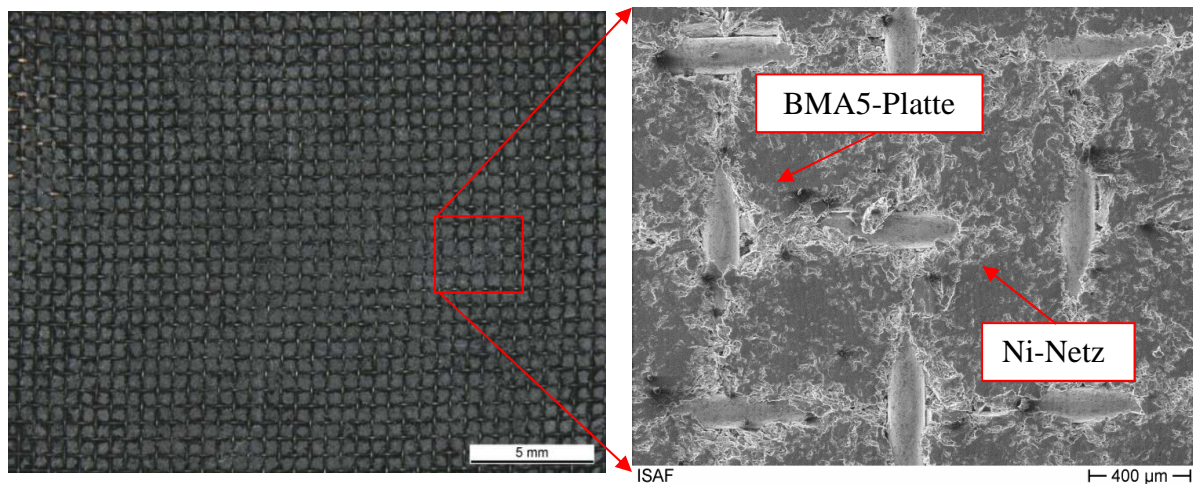


Abbildung 6.11: REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer BMA5-Platte mit einem Ni-Netz mit einer Sonotroden-Fügefläche von 30 x 30 mm bei einer $T_v=130^{\circ}\text{C}$

Nach Abschluss der metallografischen Untersuchungen wurde als Teil dieser Phase III die elektrischen Leitfähigkeit der hergestellten Verbunde in der Fügezone Mithilfe der entwickelten Vorrichtung am Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik durchgeführt (Abbildung 5.2). Diese Messungen unterscheiden sich mit der folgenden Untersuchungen in Kapitel 7 dadurch, dass hier ausschließlich der Einfluss des geschweißten

Nickelgeflechtes auf die elektrische Leitfähigkeit des Graphit-Compounds in der Fügezone gemessen wurde. Durch die einstellbare Federkraft konnten mehrere Messungen mit der reproduzierbaren Druckeinstellung des Bolzens in der Fügezone realisiert werden. Zur Beurteilung der Messwerte wurden zusätzliche Messungen von aufgelegten Ni-Netzen auf einer BMA5-Platte (ungeschweißt) unter gleichem Druck durchgeführt. Wobei bei der ungeschweissten BMA5-Platte zusätzlich die Oberfläche geschliffen wurde, damit dünne Schichten mit unkonzentriertem Graphitanteil und somit reduzierter elektrischer Leitfähigkeit erreicht werden. Ziel war Anpressdrücke von 0,5, 1,0 und 1,5 MPa zu erstellen, bei denen der Widerstand jeweils gemessen werden konnte.

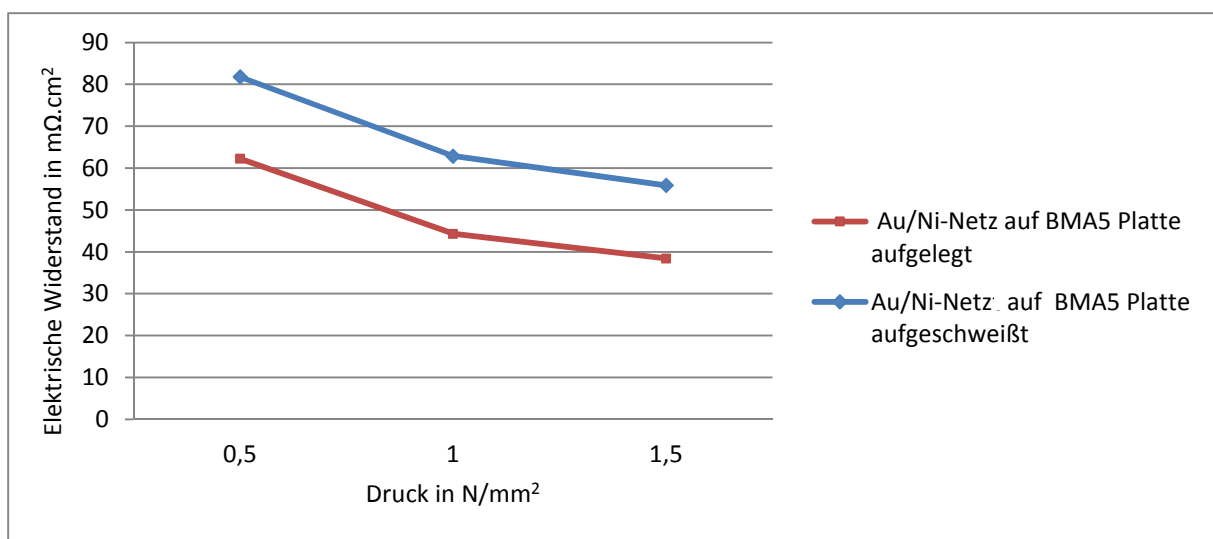


Abbildung 6.12: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung des Verbundes aus BMA5-Platte mit vergoldetem Ni-Netz

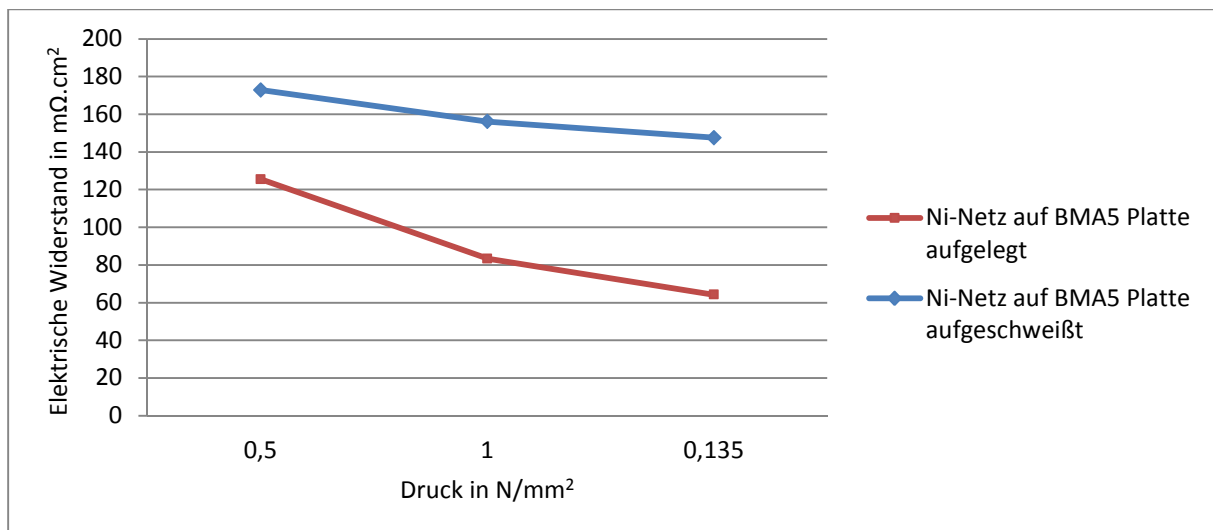


Abbildung 6.13: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung des Verbundes aus BMA5-Platte mit unbeschichtetem Ni-Netz

In Abbildung 6.12 und 6.13 sind die Ergebnisse der Messung der hergestellten Verbunde aus BMA5 mit vergoldetem und unbeschichtetem Ni-Netz geschweißt mit 16 mm runder

Sonotrodenspitze nach [Wes15, Wes15⁺] dargestellt. Es ist deutlich, dass diese Verbindung eine verminderte Leitfähigkeit als unverschweißter Verbund mit sich bringt. Die vergoldeten Netze weisen gegenüber unbeschichteten die doppelte elektrische Leitfähigkeit auf. Gleichzeitig lässt sich erkennen, dass sich bei beiden Varianten, bei Anstieg des Anpressdrucks von 1 auf 3 bar, der elektrische Widerstand um das 3-fache erhöht.

Die erreichten Ergebnisse bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit lassen keine genaue Aussage über die Ursachen der Verminderung treffen. Insbesondere die Anzahl der erstellten Proben sowie die untersuchten Schweißparameter lassen viele Fragen offen. Diese Proben wurden bei vordefinierten ungeänderten Schweißparametern durchgeführt, sodass keine Variation des Fügedrucks oder der Schweißzeit stattgefunden hat. Dadurch konnte zwar eine Verbindung hergestellt werden, aber das Zusammenspiel aus Schweißparametern und Widerstandsmessung wurde nicht abgedeckt. Zur Analyse der Ursachen sind viele Fragen aufgetaucht, die vertiefende Untersuchungen benötigen. Bei Graphit-Compounds könnte die elektrische Leitfähigkeitsminderung die Folge von Ultraschallwellen und damit eine Änderung des Füller/Binder-Gleichgewichtes an der Oberfläche sein. Die Vorwärmung oder die Reibungskräfte während des Schweißvorganges könnten zum Auftreiben der Kunststoffschmelze an der Oberfläche führen. Dadurch könnte die Bildung von Polymerfilmen eine „Isolatorwirkung“ anderer Netzdrähte zur Folge haben. Gleichzeitig könnte diese Ursachen genauso chemische Umwandlungen bei den metallischen Fügepartnern auslösen, die auch zu einer verminderten Leitfähigkeit führen. Da alle solche Fragen offen waren, bestanden das Bedürfnis, all diese Faktoren einzeln zu betrachten. Deshalb wurde bei den folgenden Untersuchungen eine Variation der Ultraschallparameter sowie eine Änderung der Methode der elektrischen Widerstandsmessung vorgenommen, um die Messung effektiver in-plane direkt durch die Fügezone durchzuführen.

6.2. Ultraschallschweißen von BMA5-Platten mit einer Gasdiffusions-Schicht in NT-PEM-Brennstoffzellen

Im Rahmen der Phase III der Voruntersuchungen wurde die Möglichkeit zum Ultraschallschweißen von BMA5-Platten mit einer Gasdiffusionsschicht zum Einsatz bei NT-PEM-Brennstoffzellen metallografisch analysiert – zum einen um vertiefende Erkenntnisse über das Verhalten des hochgefüllten Graphit-Compounds zu gewinnen, zum anderen um einen Grundbaustein zum wichtigen Thema im Bereich der Brennstoffzellentechnik zu legen. In der PEM-Brennstoffzelle zählt die Gasdiffusionsschicht (GDL) zu den wichtigen Komponenten. Sie befindet sich zwischen der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) und der

Gasverteilerplatte. Ein GDL-Gewebe trägt während des Betriebes zu kontinuierlich gleichmäßiger Einleitung der Reaktionsgase vom Gasverteiler an die MEA bei. Durch eine in der MEA stattfindende chemische Reaktion der beiden Gase entsteht Wasser. Gleichzeitig wird die erzeugte elektrische Energie und Wärme ebenfalls von der GDL an die Platte übertragen. Heutzutage wird der gesamte Stack einer Brennstoffzelle mit einem Anpressdruck von 20 bar zusammengedrückt [NN12]. Trotz dieses hohen Druckes entstehen an der Übergangsfläche Gasverteilerplatte-GDL die höchsten ohmschen Verluste. Diese Verluste führen zum direkten Leistungsabfall in der Brennstoffzelle. Dieses Problem kann man zum einen durch Erhöhung der Protonenleitfähigkeit der MEA und zum anderen durch eine Reduzierung des Kontaktwiderstands zwischen GDL und MEA beseitigen [Ism13]. In vielen Literaturquellen [Bag07, Cha07, Akb08] wurde bereits erwähnt, dass je höher die Zusammenpressung des Stacks ist, desto geringer wird der Kontaktwiderstand und somit steigt die Effizienz der PEM-Brennstoffzelle [Wes15, Wes15⁺]. Durch Verschweißen des GDL mit den Graphit-Compounds wird später bei PEM-Brennstoffzelle der Kontaktwiderstand minimiert. Somit werden die ohmschen Verluste zwischen Gasverteilerplatte und GDL minimiert und somit steigt die Gesamtleistung des Stacks.

Material	BMA5	BMA5
Fügezone in mm	Ø 16	30 x 30
Sonotroden-Amplitude in μm	28,5	8,28 (Mittelpunkt)
Sonotroden-Frequenz in Hz	19,486	18,316
Schweißzeit t_s in s	0,7	5
Haltezeit t_h in s	0,5	4
Schweißenergie E in J	70	2000
Anpresskraft P in N	70	2000
Vorwärmtemperatur in $^{\circ}\text{C}$ (Amboss)	40	140

Tabelle 6.2: Verwendete Schweißparameter

Während dieser Untersuchung wurde das Graphit-Compound ebenfalls vorgewärmt entsprechend Tabelle 6.2. Beim Auslösen des Ultraschallprozesses, mit höheren und kürzeren Schweißzeiten, wurde das Ziel die nötige Wärme zu erzeugen, nicht erreicht. Nach 0,2 s Schweißzeit weist die BMA5-Platte brüchige Erscheinungen auf, die durch unzureichende elastische Deformation der Polymer-Binder entstehen. In Abbildung 6.14 sind die Schliffbilder zur Fügezone zwischen ultraschallgeschweißtem BMA5 und GDL-Gewebe dargestellt. Zu erkennen sind die eingetauchten Kohlenfasern aus GDL in das Graphit-Compound-Material sowie der wellenförmige Verlauf der Graphitschicht, verursacht durch

die longitudinalen Wellen. Weitere elektrische oder thermische Untersuchungen wurden nicht durchgeführt. Mit dieser Studie lässt sich beweisen, dass eine Verbindung zwischen graphithaltigen Gasverteilerplatten mit thermoplastischen Bindern und einer GDL-Schicht mittels Ultraschallschweißen grundsätzlich möglich ist.

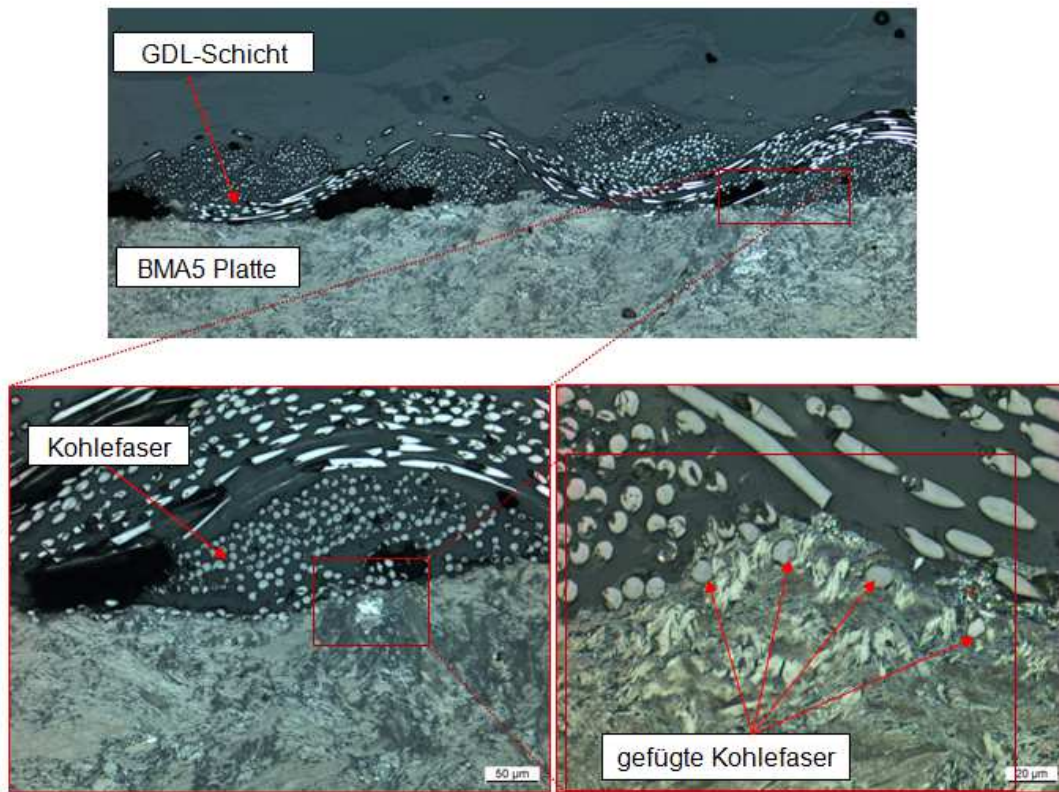


Abbildung 6.14: Schliffbilder der Fügezone beim Ultraschallschweißen von BMA5-GDL

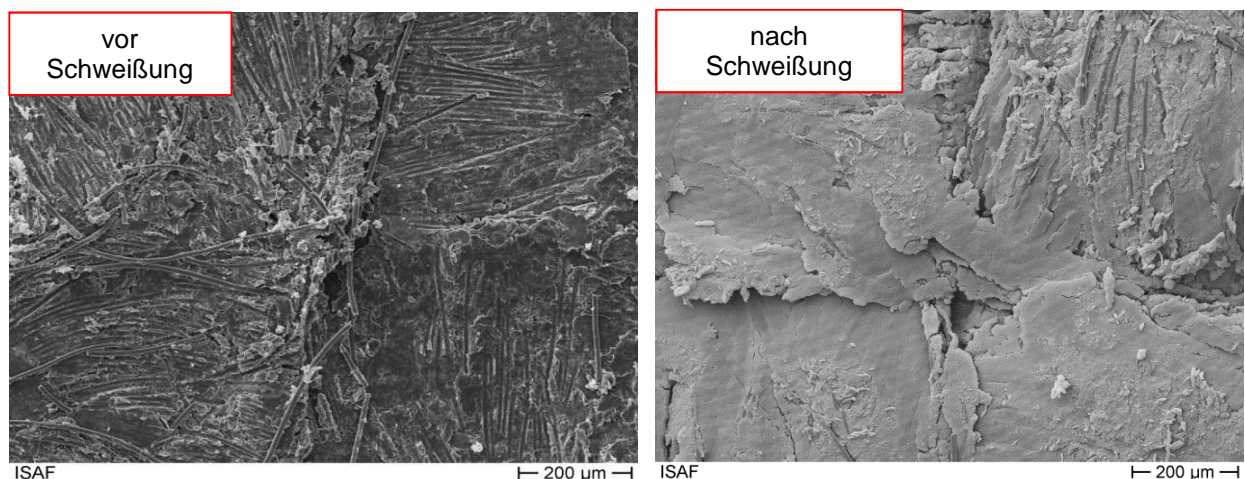


Abbildung 6.15: REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer BMA5-Platte mit GDL unter Vorwärmung mit der Sonotrode B

Die mikroskopische Analyse der GDL-Schicht vor und nach dem Schweißprozess ist in Abbildung 6.15 dargestellt. Die Kohlefaserschicht wurde per Hand abgelöst und untersucht. Es ist zu erkennen, dass die Ausübung von Ultraschallwellen auf die unbefestigte GDL-

Schicht zur starken Verschiebung der Faserstruktur in horizontaler Richtung führt. Es sind weder ein Faserablösen aus dem Gewebe noch Risse zu sehen, sondern es ist die Ablösung eines dünnen Films aus dem unteren graphithaltigen Fügepartner zu erkennen. Dieser hat kein Material in die Faserstruktur übertragen. Die Schmelzung der Polymer-Binder (PVDF) hat zu dieser Materialwanderung beigetragen.

6.3. Ultraschallschweißen von TECACOMP® PP HTE mit Edelstahlnetz

Ein letzter Teil der Phase III waren Untersuchungen zum Ultraschallschweißen von TECACOMP®-PP-HTE-Werkstoffe, die ebenfalls wie PPG86, PP als Binder enthalten, mit Nickelnetz.

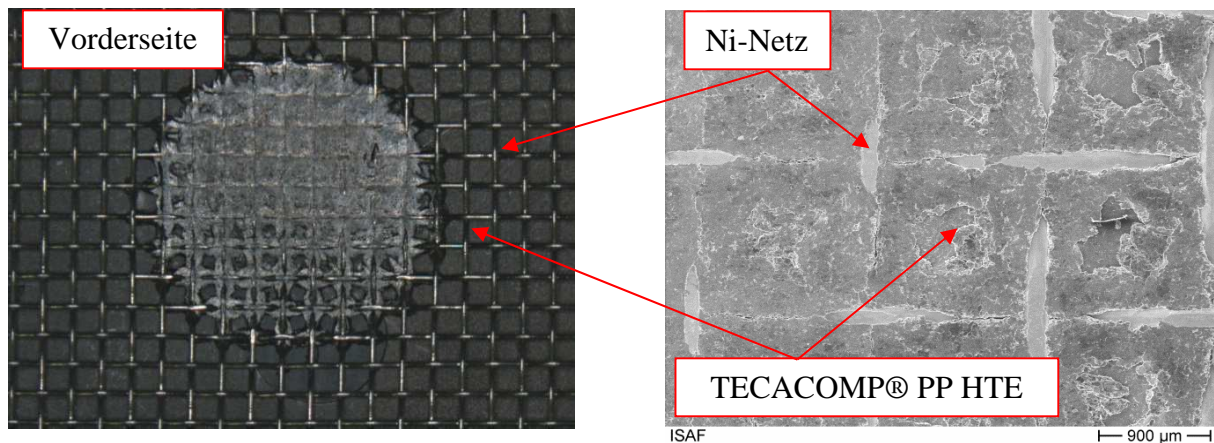


Abbildung 6.16: REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer TECACOMP®-PP-HTE-Platte mit einem Edelstahlnetz unter Vorwärmung mit der Sonotrode A (Sonotrodenseite)

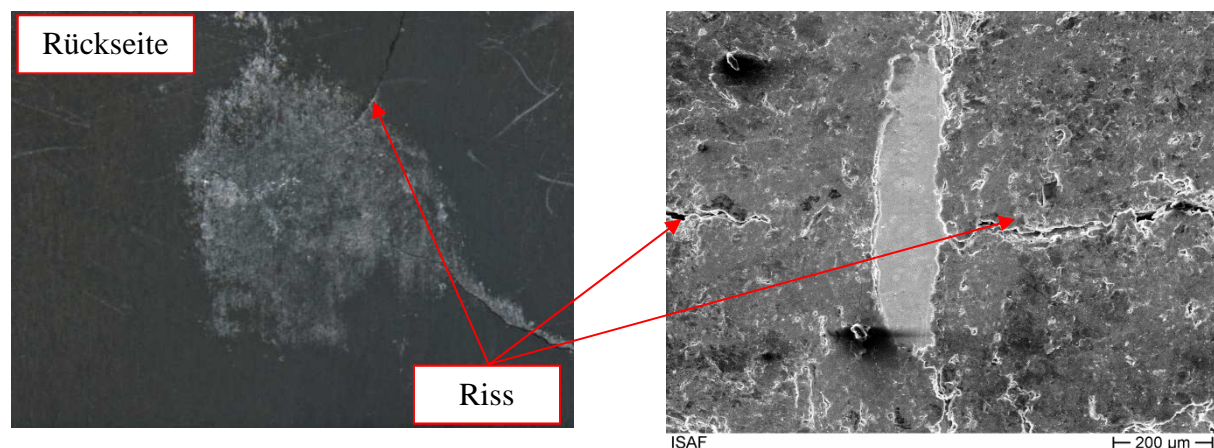


Abbildung 6.17: REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer TECACOMP®-PP-HTE-Platte mit einem Edelstahlnetz unter Vorwärmung mit der Sonotrode A (Ambosseite)

Während der Screening-Phase hat sich TECACOMP weit schlechter verhalten als die anderen Materialien und die geschweißten Proben waren ausnahmslos mit Rissen behaftet.

In Tabelle 4.2 ist zu sehen, dass alle Graphit-Compounds sehr ähnliche physikalische Eigenschaften besitzen, TECACOMP aber härter ist. Dieser Unterschied war entscheidend für

druckbasierte Fügeverfahren, da festgestellt wurde, dass diese Graphit-Compounds nicht kompatibel schweißbar mit den Parametern der PPG86-Platten sind.

Beginnend mit einer Vorwärmungstemperatur von 40 °C, einer Schweißenergie von 30 J und einer Schweißzeit von 0,2 s wurde die Graphit-Compounds Platte sofort zerrüttet. Eine Erhöhung der Vorwärmungstemperatur in 10 °C-Schritten hat ebenfalls die gleichen Ergebnisse geliefert. Erst bei Senkung der Schweißzeit auf 0,1 s und bei einer Vorwärmung auf 85 °C ist eine Verbindung zustande gekommen, die aber auch deutliche Risse enthält. Die Senkung der Schweißzeit auf 0,1 s und eine Vorwärmung auf 100 °C (Abbildung 6.16 und 6.17) erhöhte den Eintauchgrad des Netzes. Bei einer REM-Aufnahme der Oberfläche wurde die Vermutung bestätigt, dass Haarrisse entstanden sind. Bei Erhöhung der Temperatur auf 120 °C ist wieder die TECACOMP-Platte zerteilt worden. Da aber die minimal einstellbare Anpresskraft an der Ultraschallschweißanlage 70 N beträgt, war es nicht möglich, weitere Versuche unter Minderung des Schweißdrucks durchzuführen.

Es wird vermutet, dass die Compounds im Druckbereich zwischen 30 und 50 bar bei einer Vorwärmung von 70 bis 90 °C sowie bei einer Schweißzeit zwischen 0,1 und 0,2 s schweißbar sind. Mit den erreichten Untersuchungen wurde bewiesen, dass eine Verbindung der beiden Werkstoffe möglich ist, aber aufgrund der fehlenden Möglichkeit, den Schweißdruck kleiner einzustellen, wurde die weitere Betrachtung der TECACOMP-Platte in dieser Arbeit eingestellt.

6.4. Zusammenfassung der Voruntersuchungen

Bei den Voruntersuchungen wurde entsprechend Abbildung 6.1 vorgegangen. Diese unterteilte es sich in 3 Phasen. Bei der ersten Phase ging es darum, einen Eindruck über die Fügbarkeit des hochgefüllten Compounds zu schaffen. Daher wurden Versuche zum US-Schweißen mit PP Platte durchgeführt, um die Reaktionen zwischen PP und dem Polymerbinder im Compound einzuschätzen. Auch in dieser Phase konnte die Vorwärmungstemperatur als neuer Einflussfaktor getestet werden. Dies geschieht in den Phasen II und III intersiver. Gleichzeitig konnte man nach Abschluss der ersten Phase einen ersten Eindruck über die notwendige Parameterbereiche und Verbindungen zwischen beiden Fügeteilenerhalten, ohne dass die Compoundplatten brechen. Die Verbindungsmechanismus des Polymerbinder wurde in Phase II genauer untersucht, indem man zwei gleichartige Platte unter Vorwärmung geschweißt. Bei der dritten Phase konnten die bereits gewonnenen Grundkenntnisse erweitert werden, indem man unter Anwendung verschiedenen

Sonotrodengeometrien Graphit-Compounds mit Metallen und GDL Gewebe geschweißt. Mit Ende dieser Phase hat man dann, bezogen auf die Sonotrodenformen, gute Vorstellung über die Schweißparameter und das Materialverhalten des Compounds als Ansatz für die folgenden Untersuchungen in Kapitel 7.

Fazit bei den gesamten Untersuchungen war, dass rechteckige Sonotroden ein schlechtes Schwingverhalten aufweisen. Diese erforderten nicht anwendbare Schweißparameter, die zur hohen Beanspruchung des Ultraschallgenerators und der Compound-Platte führten. Diese Form wäre nur bei größeren Übersetzungsverhältnis des Booster einsetzbar, das leider mit dieser Herfurth-Ultraschallschweißanlage nicht realisierbar ist. Zum anderen wurde festgestellt, dass das US-Schweißen von Compounds mit Metallen zu Reduzierung der elektrischen Leitfähigkeit in der Fügezone führt. Diese Erscheinung ist abhängig von der steigenden Anhäufung der Kunststoffpartikel durch die erzeugte Wärme.

Bei den US-Schweißungen der Compoundplatten mit der GDL-Gewebe konnte eine mechanische Verbindung zwar mikroskopisch bewiesen werden, die Funktionalität der GDL nach der Schweißung konnte nicht getestet werden. Dies ist nur möglich durch Erprobung einer PEM-Brennstoffzelle. Davor muss durch eine optimierte Sonotrodeform mit rechteckiger Spitze eine GDL-Schicht auf die Gasverteilerplatte geschweißt werden.

7. Graphit-Compound/Metall-Verbund

7.1. Definition der Schweißparameter und Zielgrößen

Die Untersuchungen unter Verwendung eines 1.4301 Drahtgeflechtes wurden nach dem folgenden Versuchsplan durchgeführt. In Screening-Versuchen wurde zur Begrenzung des Versuchsaufwandes nur das Edelstahlnetz und das PPG/BMA5-Graphit-Compound als zweiter Fügepartner verwendet. Da die beiden Compounds unterschiedlicher Kunststoffbinder mit weit unterschiedlichen Schmelzpunkten besitzen, wurde für jedes Compound ein eigener Versuchsplan mit derselben Versuchsanzahl erstellt und bewertet. Die betrachteten Einflussfaktoren sind ebenfalls in materialspezifische und maschinentechnische Eigenschaften aufgeteilt und nach Relevanz berücksichtigt.

Wie bereits aus der Praxis des Ultraschallschweißens bekannt stellte die Schweißamplitude neben dem Schweißdruck den wichtigsten Faktor dar. In den folgenden Versuchsplänen wurde auf Einsatz der Sonotrode B verzichtet. Trotz erfolgreicher Ergebnisse bei den Voruntersuchungen führte die Amplituden-Variation im folgenden Versuchsplan zur erhöhten Anzahl von Ausreißern. Wie erwähnt liegt der erforderliche Amplitudenbereich, um PP zu schweißen, zwischen 26 und 38 μm , während dieser bei PVDF zwischen 40 und 45 μm liegt. Das heißt, die Sonotrode B kann höchstens für PPG86 effektiv eingesetzt werden. Da die Sonotrode A an der Grenze zwischen der maximal erforderlichen Amplitude von PP und der minimal erforderlichen von PVDF liegt, wurde ausschließlich diese Sonotrode eingesetzt. Diese unterschiedlichen Materialeigenschaften haben sich während der folgenden Untersuchungen durch Unterschiede zwischen den Schweißzeiten, der Schweißenergie und der Vorwärmungstemperatur bemerkbar gemacht. Aus den gewonnenen Erkenntnissen im Voruntersuchungsprozess bezüglich Schweißparametern, wurden bei dem folgenden Versuchsplan einige Ausschlußkriterien definiert. Erstens durften die graphithaltigen Platten keinen Riss aufweisen, das heißt in der Screening-Phase wurden die Schweißparameter so eingestellt, dass bei den gesamten Teilversuchen des Versuchsplans keine Risse in irgendeiner Art enthalten waren. Aufgrund der Probengröße waren die Teile nach der Entnahme aus dem Amboss ohne Hilfe vom Mikroskop, auf Risse sowohl auf der Oberfläche als auch auf der Stirnseite zu untersuchen.

Die kleinere Amplitude erforderte eine höhere Schweißzeit und eine höhere Vorwärmungstemperatur bei PVDF, sodass die Schweißungen mit der Sonotrode B meistens rissbehaftet und schwer reproduzierbar waren. Die ausgewählten Dimensionen der Fügezone

waren im Bezug auf die Material-Geometrie realisierbar. Während der Schweißungen war immer festzustellen, dass eine Abweichung von der Mitte der Compoundplatte zu Rissen an der oberen Kante führte (Abbildung 7.1). Deshalb war es nötig, immer nach fünf Schweißungen die Ambosslage neu zu justieren, um sicherzustellen, dass die Sonotrode zentrisch zur Probe steht.

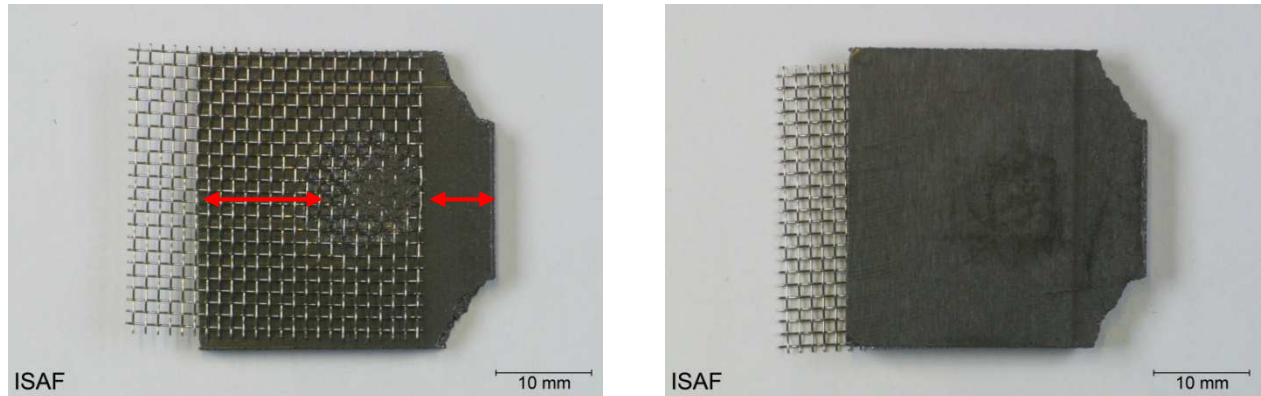


Abbildung 7.1: Risse an einer PPG86-Platte bedingt durch die Abweichung der Fügezone von der Mitte

Eine Erhöhung der Schweißamplitude auf $38\text{ }\mu\text{m}$ durch Einsatz einer dritten stufenförmigen Sonotrode mit 15 mm Arbeitsdurchmesser war aufgrund des erforderlichen Amplitudenbereichs der betrachteten Kunststoffbinder überflüssig. Damit wurden ebenfalls die Edelstahlnetze in die Graphit-Compound-Platte eingetaucht. Die Platte zeigte schon bei Erhöhung die Schweißzeit von 0,15 s auf 0,2 Risse. Für die PVDF-Platte war dies immer noch nicht genügend. Die starke Abhängigkeit zwischen Anpresskraft und Amplitude machte sich bei den Versuchen bemerkbar. Die maximal möglichen Einflussfaktoren beim Ultraschallschweißvorgang lassen sich in den folgenden Tabelle ablesen. Die berücksichtigten Parameter sind in Tabelle 7.1 gekennzeichnet.

Einflussfaktor	Betrachtet
Schweißzeit	x
Haltezeit	
Schweißenergie	x
Anpresskraft	
Triggerkraft	
Amplitude	
Vorwärmungstemperatur	x

Tabelle 7.1: Maximal mögliche Einflussfaktoren

Zur weiteren Begrenzung der anderen Einflussfaktoren wurde die Haltezeit ebenfalls nicht berücksichtigt, da der metallische Fügepartner starke Wärmestrahlung fördert, was zur

raschen Abkühlung in der Fügezone führt. Dazu kommt der starke Dickenunterschied der beiden Fügepartner sowie die kontinuierliche externe Wärmezufuhr während des Vorganges. Deshalb fand in der Realität keine vollständige Abkühlung der Fügezone wie beim normalen Ultraschallschweißen statt.

Das Graphit-Compound wurde auf die voreingestellte Amboss-Temperatur erwärmt. Durch den Schweißprozess und dessen Reibprozesse wurde die Temperatur der Fügezone noch auf die Schweißtemperatur des Polymerbinders erhöht. Anschließend sinkt sie wieder auf die Vorwärmungstemperatur. Aus diesem Grund wurde die Haltezeit als irrelevanter Parameter betrachtet und wurde bei allen Schweißungen auf 0,3 s eingestellt.

1. Vorwärmungstemperatur

Die Vorwärmungstemperatur stellte die wichtigste materialspezifische Einflussgröße zum erfolgreichen Ultraschallschweißen dieser Verbunde dar. Wie bei den Voruntersuchungen erwähnt, war die Schweißung ohne Vorwärmung und somit die Erhöhung des Erweichungsgrades des Graphit-Compounds bedingt möglich. Die hohe Sprödigkeit des Materials hat zum Bruch oder zum unvollständigen Eintauchen des Netzes geführt. Beim Schweißen ohne Anpresskraft (nur unter Berücksichtigung der Triggerkraft) wurde eine geringfügige Haftung des Netzes auf die Compound-Platte beobachtet, die mechanisch aber nicht fest, das heißt die Verbindung hat sich wieder gelöst bei späterer spanenden Bearbeitung der Probe zur Durchführung anderer Untersuchungen.

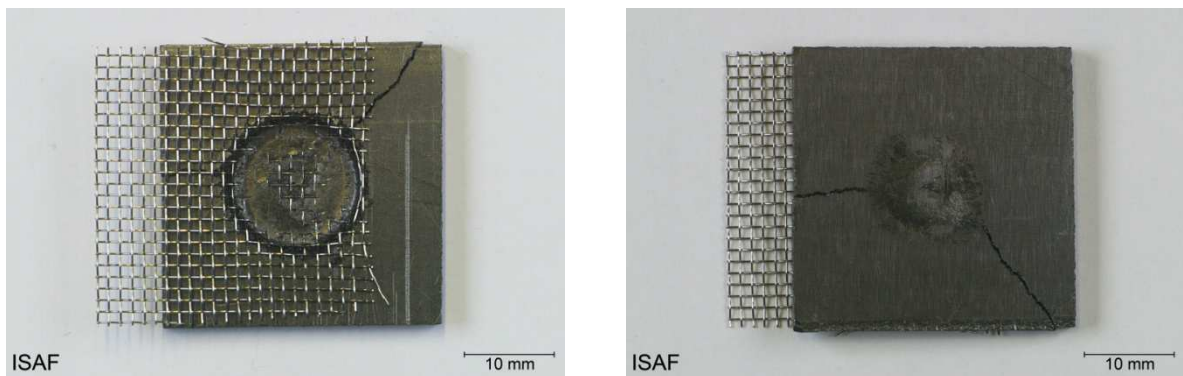


Abbildung 7.2: Risse einer PPG86-Platte bedingt durch eine zu hoch eingestellte Vorwärmungstemperatur

Die Vorwärmungstemperatur musste im Temperaturintervall zwischen Glasübergang- und Schmelztemperatur ermittelt durch DSC-Analyse gehalten werden. Zwar wurde eine Verbindung nur bei PPG-Platten ohne Vorwärmung beobachtet, bei diesen war jedoch die Schweißzeit auf $< 0,2$ s begrenzt. Eine zu hoch eingestellte Temperatur hat den Fügeweg und somit die Scherzugfestigkeit erhöht, war aber mit Querrissen beginnend von der Fügezone

behaftet (Abbildung 7.2). Nach Abschluss dieser Schweißung zerfiel die PPG-Platte nicht in kleine Stücke (wie bei Schweißungen ohne Vorwärmungen), sondern haftete noch am Netz.

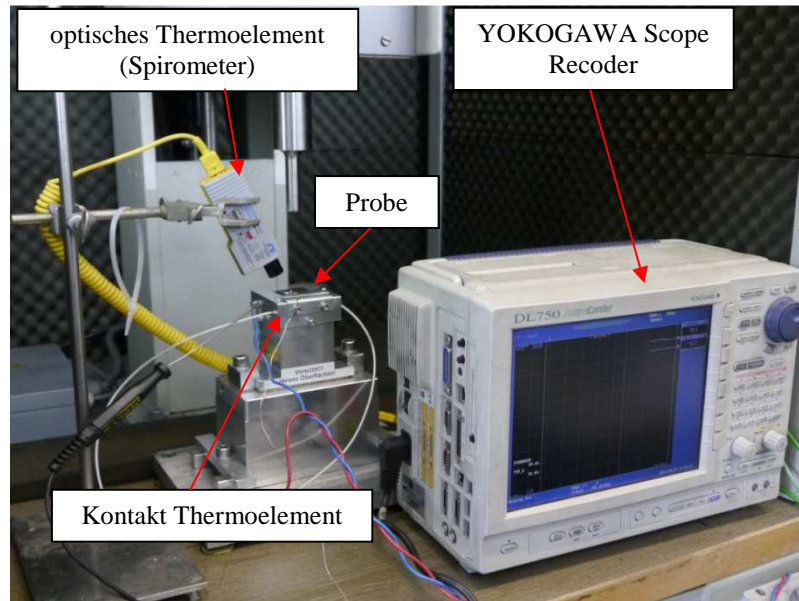


Abbildung 7.3: Versuchsaufbau zur Messung der Probentemperatur

Die Vorwärmungstemperatur wurde über Aufheizung des Ambosses gewährleistet. Um Abweichungen im Vergleich zur Probentemperatur festzustellen, wurde eine Untersuchung zur Messung der Geschwindigkeit der Wärmestrahlung für beide Compounds durchgeführt (Abbildung 7.3). Während dieses Versuches wurde die Amboss-Temperatur beginnend von der Raumtemperatur in 10 °C-Schritten erhöht. Der Amboss hat innerhalb von 10 Sekunden die Soll-Temperatur erreicht.

Gleichzeitig wurde die Oberflächentemperatur der Probe unterhalb der Sonotrode mit zwei Thermoelementen gemessen und mit dem YOKOGAWA Scope Corder aufgenommen. Das erste Thermoelement kontaktierte direkt die Probe über eine Kupferplatte von 10 x 10 mm. Da während des Schweißprozesses aufgrund der Probengröße diese Methode sehr kompliziert anzuwenden ist, wurde die Oberflächentemperatur mit einem optischen Thermoelement (Spirometer) aufgenommen.

Im Allgemeinen diente diese Untersuchung zu Prüfung der Zuverlässigkeit des optischen Spirometer. Dies war wichtig, um den Toleranzbereich zu ermitteln, da die Soll-Temperaturen laut dem Versuchsablauf in 5 °C Schritten beim PPG86 und 7,5 °C Schritten beim BMA5 varrieren werden muss. Dazu konnte die genaue Zeit bestimmt werden, die eine graphithaltige Platte benötigt, um die Amboss-Temperatur aufzunehmen.

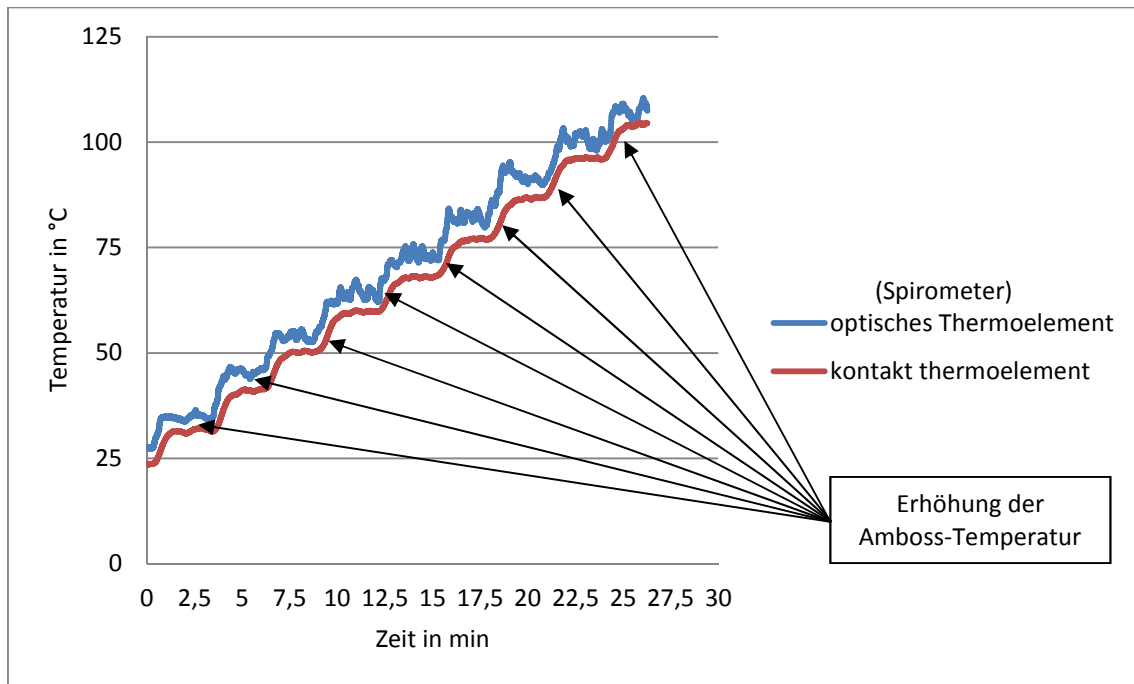


Abbildung 7.4: Gemessene Probestemperatur (PPG86) bei Änderung der Amboss-Temperatur

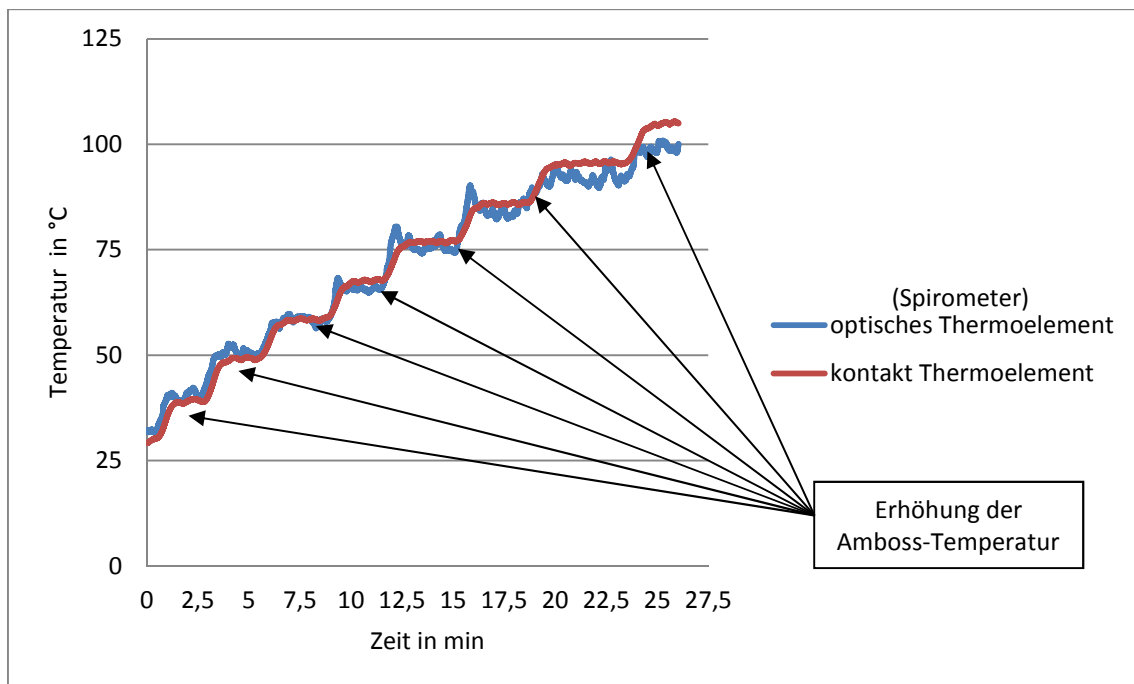


Abbildung 7.5: Gemessene Probestemperatur (BMA5) bei Änderung der Amboss-Temperatur

In Abbildungen 7.4 und 7.5 sind die Ergebnisse des Versuches im Form des Temperaturverlaufes einer PPG- und BMA5-Platte auf dem erwärmten Amboss dargestellt. An der Steigung der Rampen lässt sich die Zeit erkennen, bei der die Amboss-Temperatur durch die elektrische Regelung erhöht wird. Durchschnittlich bleibt dieses Zeitintervall bei 2,5 min während des gesamten Versuchsablaufs konstant. Die Temperaturabweichung

zwischen den beiden Thermoelementen hat bei PPG86 zwischen 3 und 5 °C geschwankt. Bei der BMA5-Platte war diese Abweichung geringer und betrug maximal 2 °C. In dem zugehörigen Diagramm ist aber ein kürzeres Zeitintervall für die Erreichung der vollständigen Wärmestrahlung in der Probe von 1,5 s im Vergleich zu PPG86 zu beobachten.

2. Schweißzeit

Die Herfurth-2500C-Ultraschallschweißanlage bietet vielseitige Möglichkeiten zur Prozess-Überwachung. In diesem Zusammenhang war die Betrachtung der Schweißzeit als Einflussfaktor unverzichtbar. Der Generator hat sich nach Ablauf der fest definierten Schweißzeit ausgeschaltet und den Schweißprozess beendet. Es wurden drei Werte für diese Größe ausgewählt. Das Schweißzeitintervall musste sehr knapp mit geringem Unterschied zwischen den Werten aufgrund der hohen Sprödigkeit des Compounds ausgewählt werden. Bei BMA5 setzte die Grenze des Plattenbruchs in der Screening-Phase bei 40 °C bereits bei 0,3 s ein. Bei der Auswahl von Werten < 0,2 s ist keine Schmelze entstanden und der metallische Fügepartner ist nicht eingesunken. Ebenfalls bewegte sich bei BMA5 das Schweißzeitintervall zwischen 0,3 und 0,4 s bezogen auf die Vorwärmungstemperaturen.

3. Schweißenergie

Die Schweißenergie stellte die Überwachungsparameter bei der COSONIC-Steuerung der Ultraschallschweißanlage dar. Der Soll-Wert wurde vor Beginn der Schweißung eingegeben. Nach Abschluss des Prozesses wurde der Ist-Wert angezeigt. Die Auswahl der Energie als paralleler Überwachungsparameter war aufgrund des bisherigen Schweißverhaltens der Werkstoffe günstig, aber gleichzeitig mit vielen Schwankungen behaftet. So wurde manchmal der Soll-Wert nicht zu 100 % erreicht.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor, der in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden konnte, war der Schweißdruck. Dieser konnte aus material- und maschinentechnischen Gründen nicht berücksichtigt werden. Die verwendete Herfurth-USV-2500C-Ultraschallschweißanlage wurde ursprünglich für Anwendungen mit hohen Anpresskräften ausgelegt. Da aber bei den folgenden Untersuchungen weder die Materialelastizität noch die Probengröße es erlaubte, Anpresskräfte > 100 N zu verwenden, wurde die Anpresskraft als Schweißparameter nicht betrachtet. Die minimal einstellbare Schweißkraft an der COSONIC-Steuerung war 70 N und diese steigt in einer Reihe von 30er oder 60er Schritten bis auf 2400 N. Die Screening-Versuche bei dieser Kraft haben nur einen bedingten Erfolg gezeigt. Dieser führt aber zu

einem verkürzten Vorwärmungs- sowie Schweißzeitbereich mit zunehmender Gefahr der Rissbildung. Dazu hat sich gezeigt, dass eine Anpresskraft von 100 N ein vollständiges Eintauchen des Netzes in das Graphit-Compound bewirkte. Somit war eine Widerstandsmessung der Schweißzone unter Betrachtung des metallischen Fügepartners als widerstandsreduzierter Faktor nicht möglich. Aus diesem Grund wurde die Schweißzeit als Steuerungsart gewählt. Die Überwachung erfolgte über die Energieregulierung und somit durch Erhöhung der Schweißzeit, die den Fügeweg im Mikrometerbereich erhöht. Wäre es technisch möglich, so würde ein Anpresskraftbereich von 30 - 80 N für diese Anwendung als relevant erscheinen.

Insgesamt wurden pro Plan fünf Wiederholungen durchgeführt. Der Ablauf der Auswertung wurde mit der Aufnahme der Ist-Generatorleistung und der Schweißenergie begonnen. Somit wurden die erfolgten Schweißungen maschinentechnisch dokumentiert. Die Messungen der Scherzugfestigkeit und der Dehnung waren die ersten Untersuchungen, um die durch Schmelzefluss hergestellte Bindung wissenschaftlich nachzuweisen. Nach Abschluss wurde mit denselben Proben der Fügeweg metallografisch ermittelt.

Zielgrößen		Betrachtet im Versuchsplan
Scherzugfestigkeit	(1)	x
Dehnung	(2)	x
Fügeweg		
Ist-Generatorleistung		
Ist- Schweißenergie		
Elekt. Widerstand bei 7 bar	(3)	x

Tabelle 7.2: Gemessene Zielgrößen

Die elektrische Widerstandsmessung wurde mit einem dafür entwickelten Prüfstand bei verschiedener Druckausübung ermittelt. Aus den ermittelten Ergebnissen wurde herausgestellt, wie sich der Widerstand in Abhängigkeit des Drucks ändert. Um den Auswertungsaufwand zu minimieren, wurden die Messungen bei 1,4 und 7 bar im Versuchsplan betrachtet. Die letzte Untersuchung war die Messung der thermischen Leitfähigkeit. Um diese zu bestimmen, wurde die spezifische Wärme und Dichte der Proben ermittelt und mit dem Wert der Temperaturleitfähigkeit berechnet. Da einige Proben des Versuchsplans eine geringe Verbindungsfestigkeit aufwiesen und sich somit bei der spanenden Fertigung der Proben auf Ø 12,7 mm die Verbindung auflöste, wurden stabilere Proben mit verschiedenen Schweißparametern ausgewählt und ausgewertet. In Tabelle 7.2 sind die gemessenen Zielgrößen aufgestellt und die im Versuchsplan betrachteten markiert.

7.2. Erstellung des Versuchsplans

Nachfolgend sind die Tabellen 7.3 – 7.6 der verwendeten Faktorstufen sowie die mittels Software Statgraphics Centurion XVII, Version 17.10.6, erstellten Versuchspläne dargestellt. Bemerkbar ist, dass die ausgewählten Werte bei PPG86 kleiner sind als bei PVDF. Dies bezieht sich auf Voruntersuchungen, chemische Zusammensetzungen, anlagentechnisch realisierbare Einstellungen sowie vordefinierte Randbedingungen. Bei der Definition der Einflussparameter in Statgraphics könnte zwischen qualitativen und quantitativen Größen unterschieden werden. Die beiden Werkstoffe wurden aufgrund unterschiedlichem Schmelztemperaturbereich von PP und PVDF in zwei verschiedenen Versuchspläne betrachtet. Aus diesem Grund ist die Betrachtung des Materials als qualitative Größe in einem einheitlichen Versuchsplan nicht möglich.

Einflussfaktor	Stufenwerte PPG86	Abkürzung	Stufenzahl
Schweißzeit (ts) in s	[0,2; 0,24; 0,28]	[ts₁;ts₂;ts₃]	3
Schweißenergie (E) in J	[30; 45; 60]	[E₁;E₂;E₃]	3
Vorwärmungstemperatur (T_v)in °C	[40; 45; 50]	[T_{v1};T_{v2};T_{v3}]	3

Tabelle 7.3: Verwendete Faktorstufen für PPG86

Einflussfaktor	Stufenwerte BMA5	Abkürzung	Stufenzahl
Schweißzeit (ts) in s	[0,3; 0,35; 0,4]	[ts₄;ts₅;ts₆]	3
Schweißenergie in J	[60; 80; 100]	[E₄;E₅;E₆]	3
Vorwärmungstemperatur in °C	[40; 47,5; 55]	[T_{v4};T_{v5};T_{v6}]	3

Tabelle 7.4: Verwendete Faktorstufen für BMA5

Wichtig ist anzugeben, ob die restlichen Parameter stetig ansteigend sind oder nicht. Bei bestehender Kontinuität errechnet das Programm einen Mittelwert automatisch. Im Falle dieser Arbeit waren ein Faktorplan aus 12 Versuche, der Box-Behnke-Plan und ein zentral zusammengesetzter Plan (flächenzentriert) am effektivsten, da ein orthogonaler Plan Zentrumsunkte liefert, die technisch nicht einstellbar sind. Da der ausgewählte Faktorplan

eine hohe Auflösung, FG sowie die geringste Anzahl von Teilversuche erfordert, wurde dieser ausgewählt.

Proben Nr.	Schweißzeit in s	Schweißenergie in J	Vorwärmungstemperatur in °C
PPG-1	0,2	30	50
PPG-2	0,2	30	40
PPG-3	0,28	30	40
PPG-4	0,24	45	45
PPG-5	0,28	60	50
PPG-6	0,28	30	50
PPG-7	0,24	45	45
PPG-8	0,28	60	40
PPG-9	0,2	60	50
PPG-10	0,24	45	45
PPG-11	0,24	45	45
PPG-12	0,2	60	40

Tabelle 7.5: Faktorplan für PPG86 mit drei Faktoren und vier Zentrumsunkten

Proben Nr.	Schweißzeit in s	Schweißenergie in J	Vorwärmungstemperatur in °C
BMA-1	0,3	60	55
BMA-2	0,3	60	40
BMA-3	0,4	60	40
BMA-4	0,35	80	47,5
BMA-5	0,4	100	55
BMA-6	0,4	60	55
BMA-7	0,35	80	47,5
BMA-8	0,4	100	40
BMA-9	0,3	100	55
BMA-10	0,35	80	47,5
BMA-11	0,35	80	47,5
BMA-12	0,3	100	40

Tabelle 7.6: Faktorplan für BMA5 mit drei Faktoren und vier Zentrumsunkten

7.3. Vergleich Soll/Ist-Schweißenergie

Während der Versuchsdurchführung wurde durch das COSONIC-Steuergerät die Ist-Schweißenergie aufgenommen. Dies geschieht nur bei der ersten Wiederholung. Wie bereits erwähnt wurde bei der Ultraschallschweißmaschine die Schweißzeit als Steuerungsart und die Schweißenergie als Überwachungsparameter gewählt. Es könnte auch die Zeit als Überwachungsart ausgewählt werden. Da aber die Schweißzeit als stärker geprägte Größe betrachtet wurde (insbesondere in Bezug auf die Festigkeit), wurde damit der Schweißprozess gesteuert.

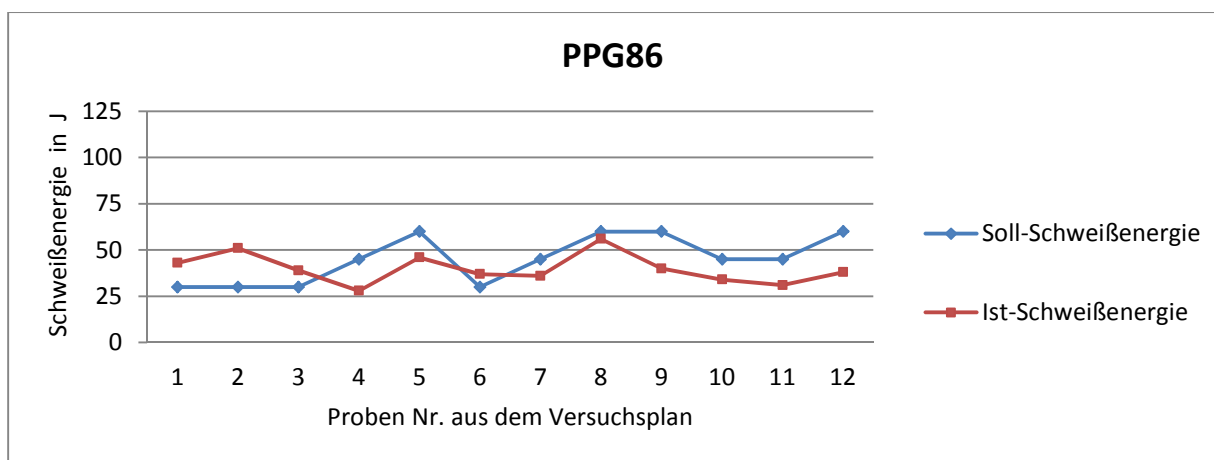


Abbildung 7.6: Vergleich der Soll-Ist-Schweißenergie bei PPG86

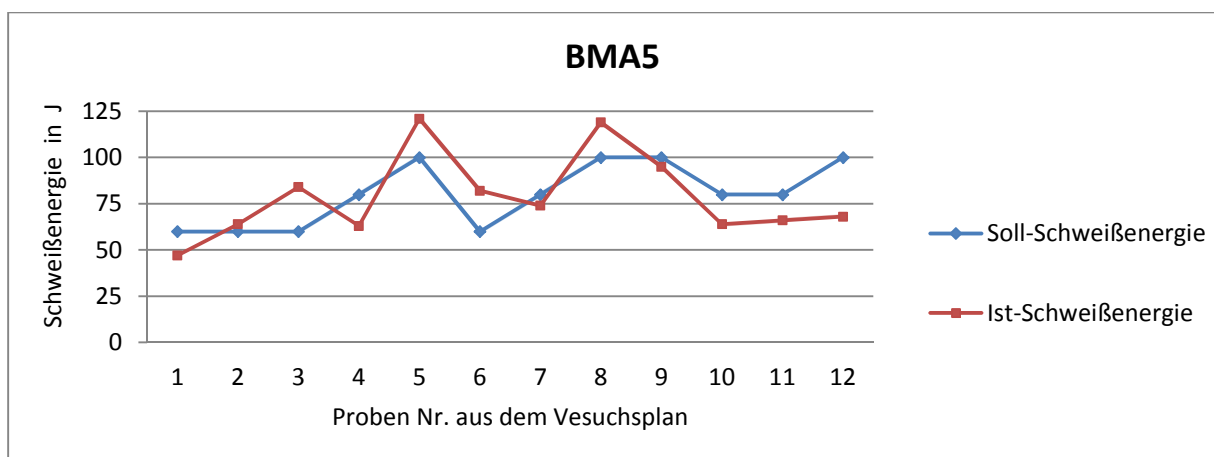


Abbildung 7.7: Vergleich der Soll-Ist-Schweißenergie bei BMA5

Nach Abschluss jedes Schweißversuchs laut Versuchsplans (5 Wiederholungen), wurden die Ist-Schweißenergien auf dem Bildschirm der COSONIC-Steuerung abgelesen und deren Mittelwert mit der Soll-Schweißenergie aus dem Versuchsplans verglichen (Abbildungen 7.6 und 7.7). Bei beiden Versuchsplänen war eine auffällige Abweichung. Die Abweichung bei

PPG86 betrug minimal 7 % und maximal 30 %. Bei BMA5 betrug die Abweichung minimal 13 % und maximal 30 %. Diese Werte entsprechen bei allen Schweißungen einer voreingestellte Toleranz von $\pm 30 \%$ in der COSONIC-Steuerung der Ultraschallschweißanlage. Mit den registrierten Abweichungen wurde somit bei allen Proben der Schweißvorgang erfolgreich abgeschlossen.

7.4. Temperaturverlauf in der Fügezone

Bisher hat sich die Temperaturmessung in der Fügezone beim Ultraschallschweißen als technisch sehr kompliziert erwiesen. Die verwendete Probengeometrie für beide Fügepartner besteht wie vorher beschrieben aus rechteckigen Platten. Eine thermografische Aufnahme mit einer Wärmebildkamera konnte nach Kontakt der Sonotrode in der Fügezone keine wissenschaftlich relevanten Ergebnisse zeigen. Damit konnte nur die Temperatur am äußeren Rand der Sonotrode und des Edelstahlnetzes aufgenommen werden. Da die entstehende Temperatur beim Schweißen eine wichtige Größe für die Schmelzebildung und die Schweißnahtfestigkeit darstellt, wurde der Temperaturverlauf ab der Vorwärmungsphase bis zum Ende des Schweiß- und Abkühlvorganges durch ein Thermoelement vom Typ K bestimmt, welches durch den Amboss in den unteren Fügepartner (Graphit-Compound-Platte) durchgezogen wurde.

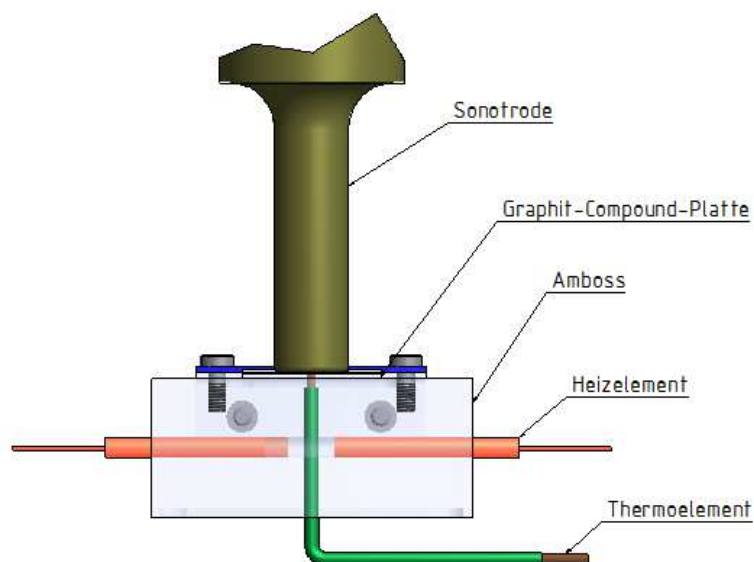


Abbildung 7.8: Schematische Darstellung des Temperaturmessaufbaus in der Fügezone

Der Messaufbau ist in Abbildung 7.8 dargestellt. In der Mitte der Compoundplatte wurde eine 2 mm-Bohrung mit einer Tiefe von 2,9 mm platziert. Damit steht die Thermoelementspitze 0,1 mm unterhalb der Fügezone. Durch eine geeignete Nut in der unteren Amboss-Seite wurde

eine planparallele Befestigung des Ambosses mit der Grundplatte der Ultraschallschweiß-Anlage gewährleistet. Das Thermoelement wird an den YOKOGAWA Scope Coder angeschlossen. Mit diesem Versuch konnte eine gute Annäherung an den tatsächlichen Temperaturverlauf während des Schweißens erzielt werden, aber dies wurde nicht für alle Proben aus den Versuchsplänen durchgeführt, sondern an jeweils zwei Proben mit minimalen und maximalen Einstellparametern. Dies sind Proben PPG-1/5 und BMA-1/5.

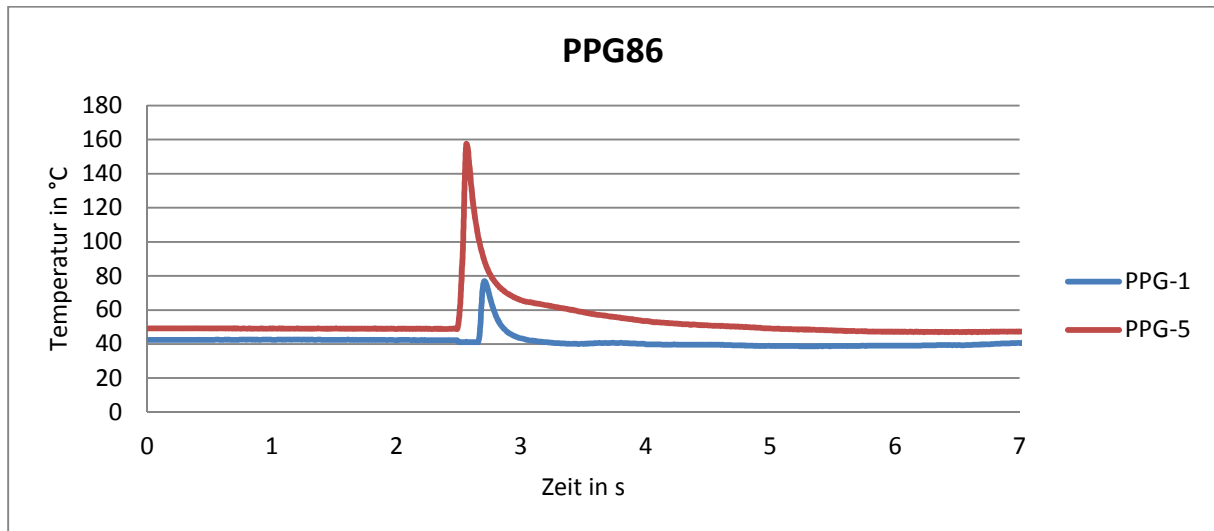


Abbildung 7.9: Temperaturverlauf in der Fügezone während des Vorwärmungs- und Schweißprozesses bei den Proben PPG-1 und PPG-5

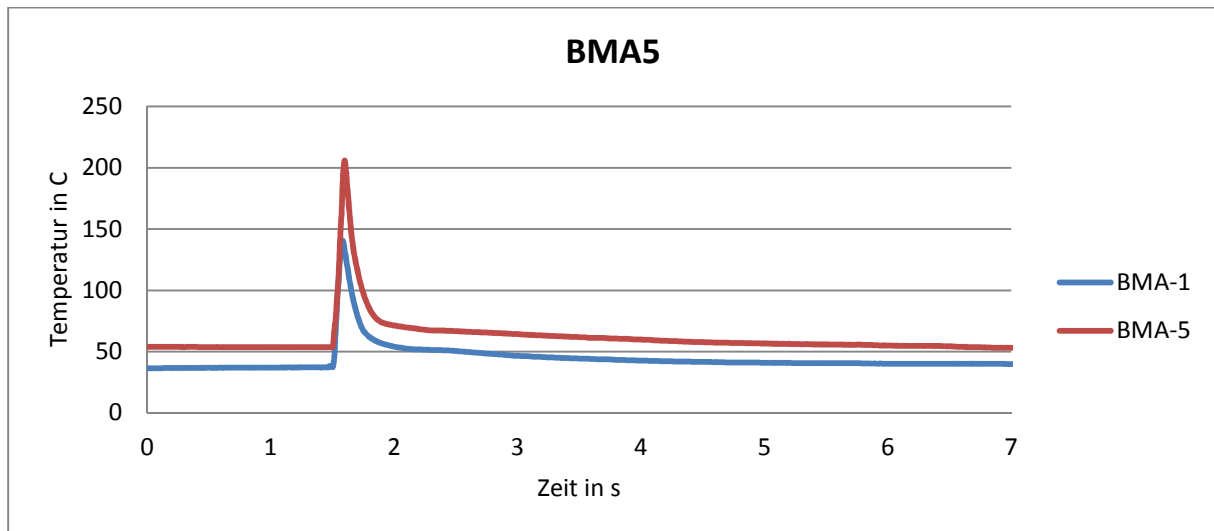


Abbildung 7.10: Temperaturverlauf in der Fügezone während des Vorwärmungs- und Schweißprozesses bei den Proben BMA-1 und BMA-5

Die aufgenommenen Verläufe sind in den Abbildungen 7.9 und 7.10 dargestellt. Bei allen Proben beginnt die Aufzeichnung mit der Erreichung der Vorwärmungstemperatur. Nach Einschaltung des Ultraschalls steigt diese schlagartig und erreicht bei PPG-1 eine Grenze von

80 °C, bei PPG-5 160 °C. Bei beiden Messungen wurde die gemessene Schweißtemperatur des Graphit-Compounds oberhalb der Glasübergangstemperatur ermittelt bei der DSC-Analyse im Kapitel 4.2.2. Bei den BMA-Proben wurde ebenfalls die Erweichungstemperatur überschritten. Bei BMA-1-Proben wurde eine Temperatur von 140 °C und bei BMA-5 von 205 °C erreicht.

7.5. Einfluss der Schweißzeit auf den Fügeweg

Der Fügeweg gehört zu den einstellbaren Einflussfaktoren beim Ultraschallschweißen. In der modernen Schweißanlage ist diese Größe auch durch die relative Bewegung der Sonotrode nach Anschalten des Ultraschalls messbar. Da dies bei der eingesetzten Anlage nicht der Fall ist, wurde der Fügeweg jeder Probe lichtmikroskopisch mittels Auflichtmikroskops mit einer motorischen z-Achse ermittelt, das heißt die Nullpunktlage wurde an einem Punkt außerhalb der Fügezone festgelegt und davon ausgehend die relative Tiefe in der Mitte der Fügezone aufgenommen (Abbildung 7.11). Dies geschah bei denselben Proben nach Abschluss der Scherzugfestigkeitsuntersuchung. Die Ermittlung des Fügeweges dient als Ausmaß für den ausgelösten Schmelzefluss und die Restschmelzedicke in der Fügezone.

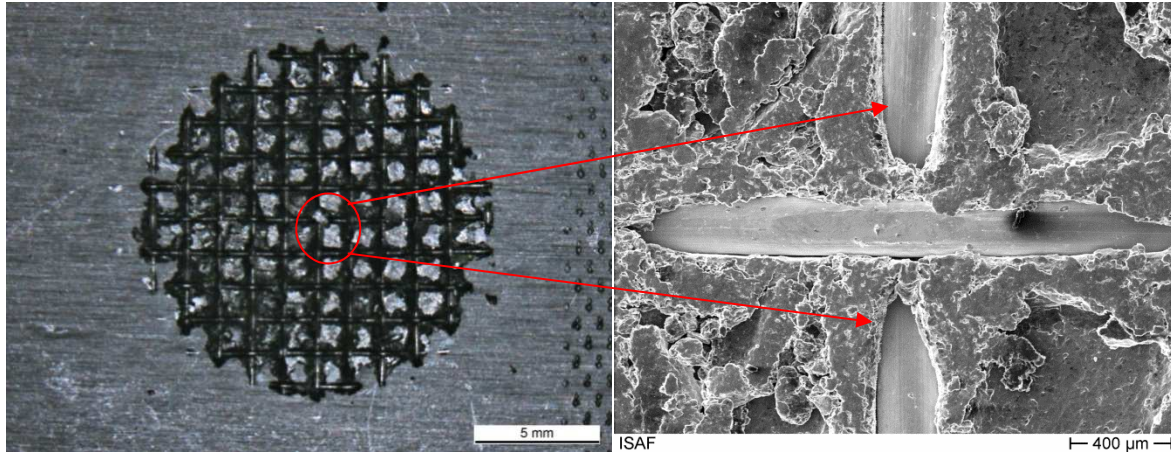


Abbildung 7.11: Messpunkt des Fügeweges in der Fügezone

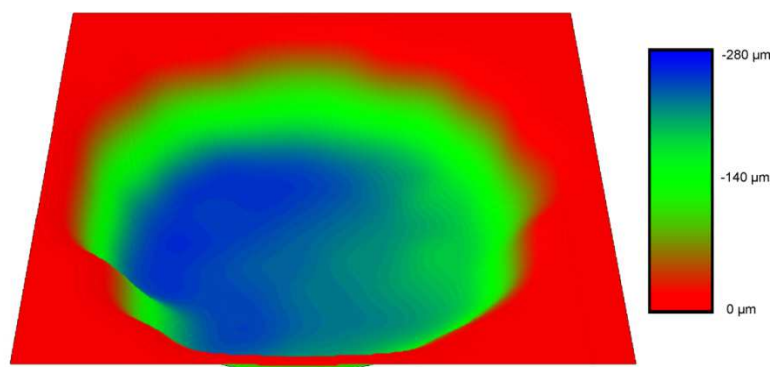


Abbildung 7.12: 3D Multifokus-Rekonstruktion der Fügezone bei BMA-1

In Abbildung 7.12 ist der über die gesamten Netzkreuzungen in der Fügezone ebenfalls lichtmikroskopisch aufgenommene Fügweg mittels 3D Multifokus - Rekonstruktion zur Beurteilung des Schädigungsverhaltens des Compounds dargestellt. Die grüne Zone zeigt ein gleichmäßiges Eintauchen des Netzes in das Compound.

Die Unregelmäßigkeiten in der blauen Zone sind durch ungleichmäßiges Abtragen während des Scherzugversuchs entstanden.

In den Abbildungen 7.13 und 7.14 sind die Mittelwerte des ermittelten Fügeweges bei PPG86 und BMA5 aus dem jeweiligen Versuchsplan in Abhängigkeit der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur dargestellt. Beide Größen stellen die wichtigsten Einflussfaktoren bezüglich der Schweißnahtfestigkeit dar.

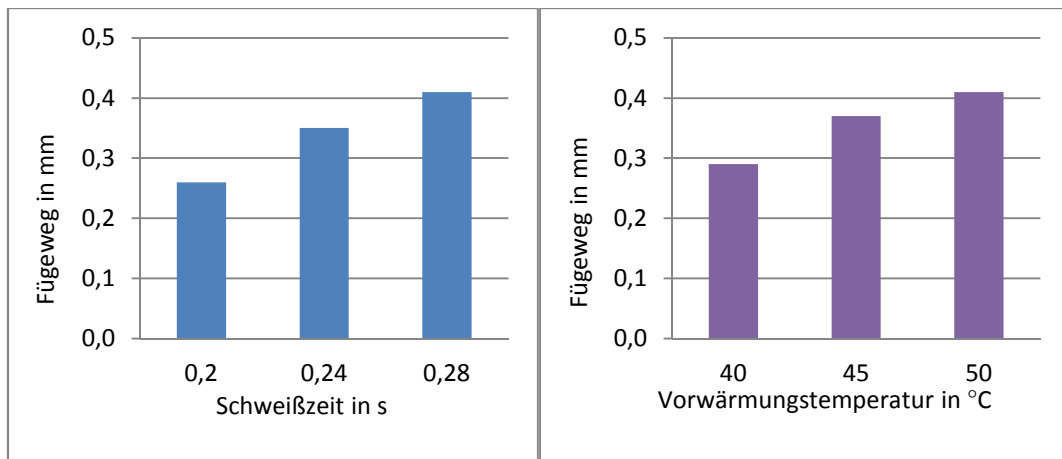


Abbildung 7.13: Korrelation Fügweg/Schweißzeit sowie Fügweg/Vorwärmungstemperatur bei PPG8

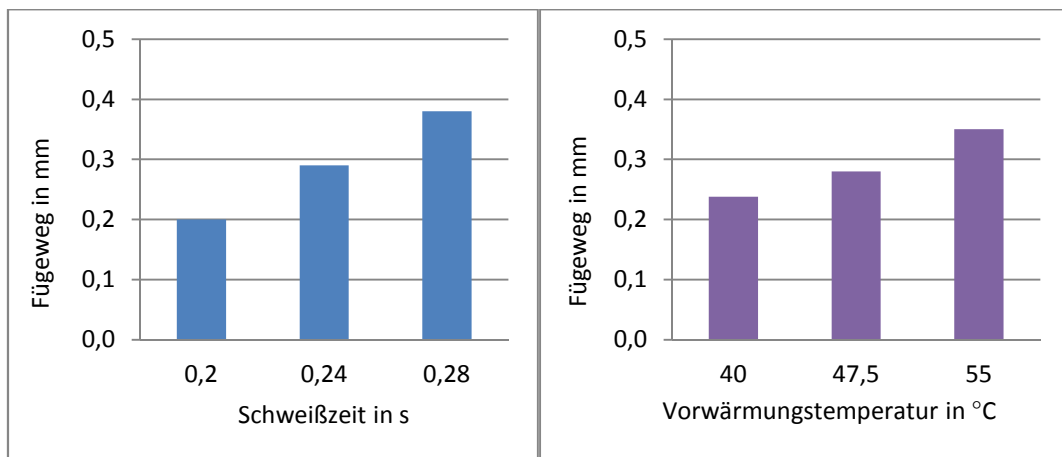


Abbildung 7.14: Korrelation Fügweg/Schweißzeit sowie Fügweg/Vorwärmungstemperatur bei BMA5

Die gemessenen Werte beider Werkstoffe zeigen in Abhängigkeit der Einflussfaktoren eine fast konstante Differenz und einen kontinuierlichen Anstieg auf. Eine Erhöhung der Schweißzeit oder Vorwärmung bewirkt eine Erhöhung des Schmelzefflusses sowie des

Fügeweges und somit der Schweißnahtfestigkeit. Bei der Auswertung des PPG86 betrug der Fügeweg zwischen 0,25 und 0,4 mm bezogen auf beide Einflussfaktoren, bei BMA5 hingegen 0,2 und 0,35 mm. Dies ist auf die unterschiedliche Erweichungstemperaturen der beiden Polymer-Binder PP und PVDF zurück-zuführen.

7.5.1. Regressionsmodell

Nach Abschluss aller Schweißungen laut Versuchsplan und aller geplanten Messungen erfolgte die Eingabe in STATGRAPICS, um das Regressionsmodell und die Bestimmtheitsmaße für die jeweiligen Zielgrößen zu berechnen. Aufgrund der hohen Anzahl an messbaren Zielgrößen erfasst die folgende Modellbildung nur die wichtigsten, bei denen die Einflussfaktoren die größte Rolle unter Betrachtung der späteren Anwendung spielen. Die nachkommende Vorgehensweise bei der Modellerstellung wurde schon einmal beim Hochfrequenzschweißen von Fritzsche [Fri02] angewendet. Aufgrund der Einfachheit und Übersichtlichkeit wurde die folgenden Auswertungen ultraschallgeschweißter Verbindungen an diese Vorgehensweise angelehnt.

$$y = a_0 + a_1*A + a_2*B + \dots + a_m*x_m + a_{12}*x_1*x_2 + \dots$$

Das Diagramm zeigt die Struktur des Regressionsmodells mit folgenden Beschriftungen:

- Absolutglied:** a_0
- Lineare Glieder:** $a_1*A, a_2*B, \dots, a_m*x_m$
- Zweifachwechselwirkung:** $a_{12}*A*B$
- Dreifachwechselwirkung:** $a_{123}*A*B*C$

$$y = a_0 + a_1*A + a_2*B + a_3*C + a_{12}*A*B + a_{13}*A*C + a_{23}*B*C + a_{123}*A*B*C$$

Abbildung 7.15: Regressionsmodell für lineare Abhängigkeit nach [NN15*]

Da bei der Auswahl des Versuchsplans nur wenige Informationen über Form der Abhängigkeit (Linearität) zwischen Einflussparameter und Zielgrößen vorhanden sind, wurde – wie in solchen Fällen üblich – der Versuchsumfang so klein wie möglich mit einem linearen Zusammenhang gewählt. Dieser kann später bei zunehmender Gewissheit durch Erhöhung der Anzahl der Versuche quadratisch betrachtet werden. Bei Plänen erster Ordnung mit linearer Abhängigkeit kann das Modell aus linearen Gliedern und Wechselwirkungen berechnet werden (Abbildung 7.15). Dies kann mit aufgenommen werden, falls zweifache Wechselwirkungen vorhanden sind. Wie vorher erwähnt, haben dreifache Wechselwirkungen in der Praxis eine sehr geringe Bedeutung [NN15*]. Die Zielgrößen in den folgenden Regressionsmodellen wurden nach der Gleichung in Abbildung 7.15 berechnet. Der

Varianzinflationsfaktor (VIF) war bei allen Koeffizienten gleich 1. Dieser Faktor gibt die Wechselbeziehung zwischen den Einflussgrößen an und führt zur Ausbreitung des Vertrauensbereiches der Koeffizienten. Der F-Quotient ist das Verhältnis aus dem mittleren Quadrat und dem Gesamtfehler. Der p-Wert gibt die statistische Signifikanz an. Ein Wert $< 0,05 \%$ bedeutet, dass ein Effekt signifikant von Null verschieden ist bei einem 95-%-Konfidenzniveau. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) deutet auf den Anteil der Streuung der Zielgrößen in den Regressionsgleichungen hin, das heißt, dass bei 74 % das individuelle Modell 74 % der Variabilität der entsprechenden Zielgröße erklärt. Das korrigierte R^2 ist auf die Freiheitsgrade bezogen und ist ausschlaggebend für einen Vergleich von Modellen mit ungleicher Anzahl an Variablen. Der Standardfehler der Schätzwerte gibt die Standardabweichung der Residuen an. Die Residuen sind die Differenzen zwischen Mess- und Erwartungswerten der entsprechenden Zielgröße. Der mittlere absolute Fehler ist der Mittelwert der Residuen.

7.6. Metallografische Untersuchung

Diese soll anhand von Querschliffen durch die Fügezone an den Proben den Bindungsmechanismus und die mögliche Rissenstehung erfolgen (Abbildung 7.16 - 7.17). Es wurden aber nicht alle 24 Proben untersucht, sondern jeweils drei Proben mit unterschiedlichen Einflussfaktoren laut Tabelle 7.3 und Tabelle 7.4 ausgewählt. Diese sollten den Grad der Festigkeit des Verbunds vertreten. Proben mit niedriger Festigkeit mussten während der Scherzugprüfung aufgrund der Gefahr der Verbindungslösung bei der Klemmung an der Zugmaschine mit großer Sorgfalt behandelt werden.

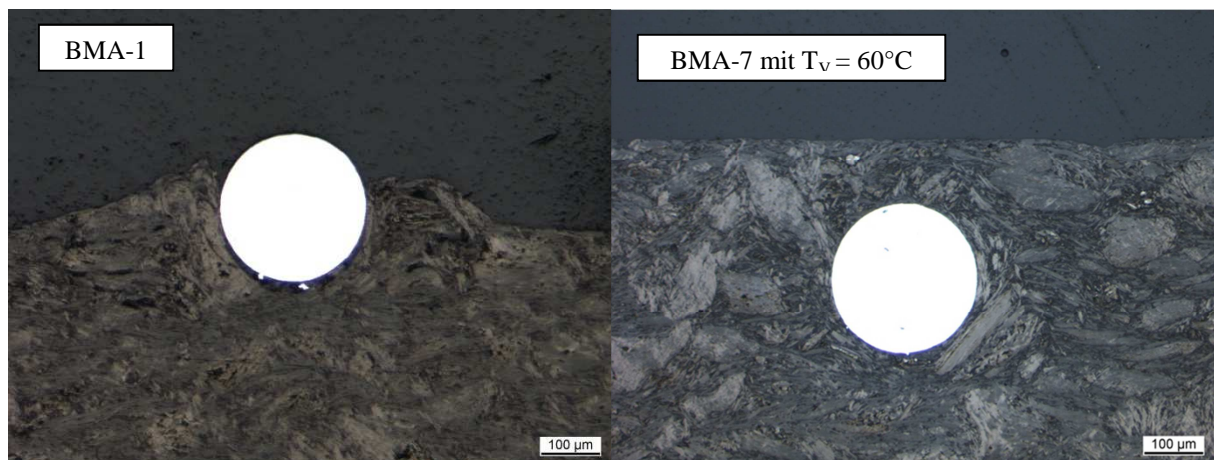


Abbildung 7.16: Querschliffbilder durch die Fügezone bei den Proben PPG86-1 und BMA5-7 mit $T_v = 60^\circ\text{C}$

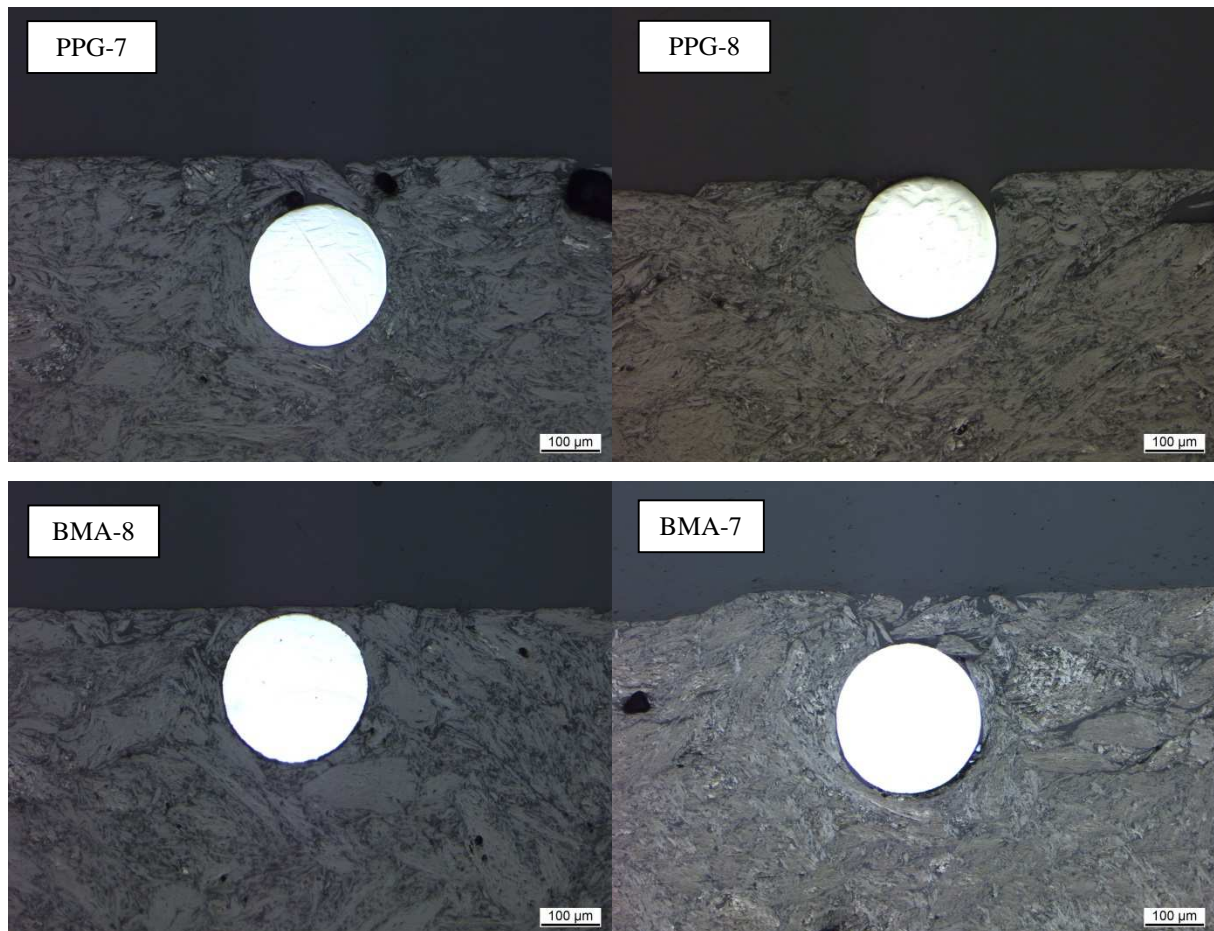


Abbildung 7.17: Querschliffbilder durch die Fügezone bei den Proben PPG86-7/8 und BMA5-7/8

Diese Untersuchung erlaubt ebenfalls die genauere Messung des Fügeweges beziehungsweise des Eintauchgrades des Netzes in das graphithaltige Substrat. Damit kann die Schweißnahtfestigkeit abgeschätzt werden. Bei den untersuchten Proben lässt sich die Einbaulage des eingedrückten Netzes erkennen. Dies ist durch die hervorgerufene Schmelze-Bildung in das Graphit-Compound eingebettet. Bei den Proben mit den kleinsten eingestellten Schweißparametern (PPG-1, BMA-1) lässt sich sehen, dass der Edelstahlraht maximal zur Hälfte eingetaucht ist. Durch den Anpressdruck sowie die Ultraschallfrequenzen sind Risse an der Oberfläche entstanden, nicht aber in der unteren Drahtumgebung. Bei Steigung der Schweißparameter (PPG-7, BMA-7) wird nun der Draht zu 80 % überdeckt und eine kleine Fläche bleibt an der Oberfläche ertastbar. Bei den maximalen Werten der Einflussfaktoren (PPG-7, BMA-7) taucht der Draht vollständig unterhalb der Compound-Oberfläche ein. Dabei entstehen Risse oberhalb des Drahtes, die bei PPG-7 von der Schmelze wieder überdeckt werden. Bei allen untersuchten Proben sind keine Risse beziehungsweise Gefügeschäden des graphithaltigen Compounds nachgewiesen worden. Abbildung 7.18 stellt die Querschliff-Bilder mit der gesamten Übersicht der Fügezone dar.

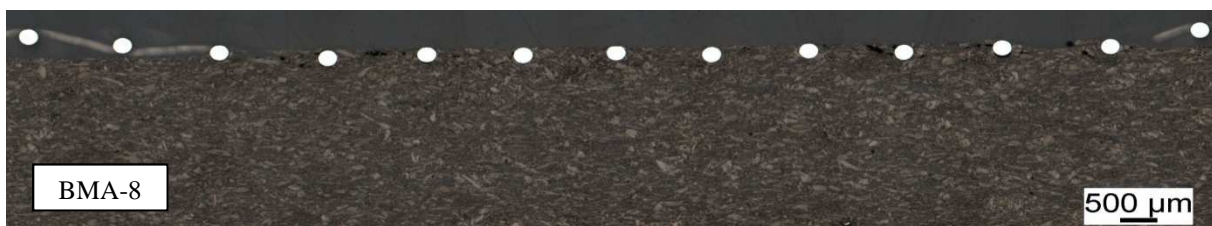


Abbildung 7.18: Querschliffbilder durch die gesamte Fügezone bei den Proben PPG86-7/8 und BMA-1/7/8

7.7. Modellbildung für die Scherzugfestigkeit

Die Bewertung des Regressionsmodells und deren Bestimmtheitsmaße für die Scherzugfestigkeit sind in Tabelle 7.7 dargestellt.

	PPG86				BMA5			
Koeffizient	Schätzwert	Mittlere Quadr.	F Quotient	P Wert	Schätzwert	Mittlere Quadr.	F Quotient	P Wert
A:Schweißzeit	534,56	5125,70	14,57	0,0124	346,08	3458,62	8,13	0,0357
B:Schweißenergie	2,25	1252,61	3,56	0,1178	-0,58	1,5312	0	0,9545
C:VT	-0,41	8399,38	23,87	0,0045	2,47	2590,56	6,09	0,0566
AB	-15,98	734,97	2,09	0,208	1,3	13,67	0,03	0,8647
AC	18,78	112,80	0,32	0,5957	-0,73	0,6	0	0,9714
BC	0,05	126,40	0,36	0,5751	0,002	0,89	0	0,9651
$R^2 = 90,1551\%$ R^2 (korrigiert für FG) = 78,3413% Standardfehler der Schätzung = 18,7581 Mittl. Absolutfehler = 8,67444					$R^2 = 74,0494\%$ R^2 (korrigiert für FG) = 42,9087 % Standardfehler der Schätzung = 20,6194 Mittl. Absolutfehler = 9,45167			

(1)

Tabelle 7.7: Regressionsmodell für die Scherzugfestigkeit

In den Abbildungen 7.19 und 7.20 ist die Darstellung aller Haupteffekte auf die Mittelwerte der Zielgröße Scherzugfestigkeit bei beiden Graphit-Compounds quantitativ dargestellt. Jede Einflussgröße hatte drei Stufen inklusive Zentrumspunkt.

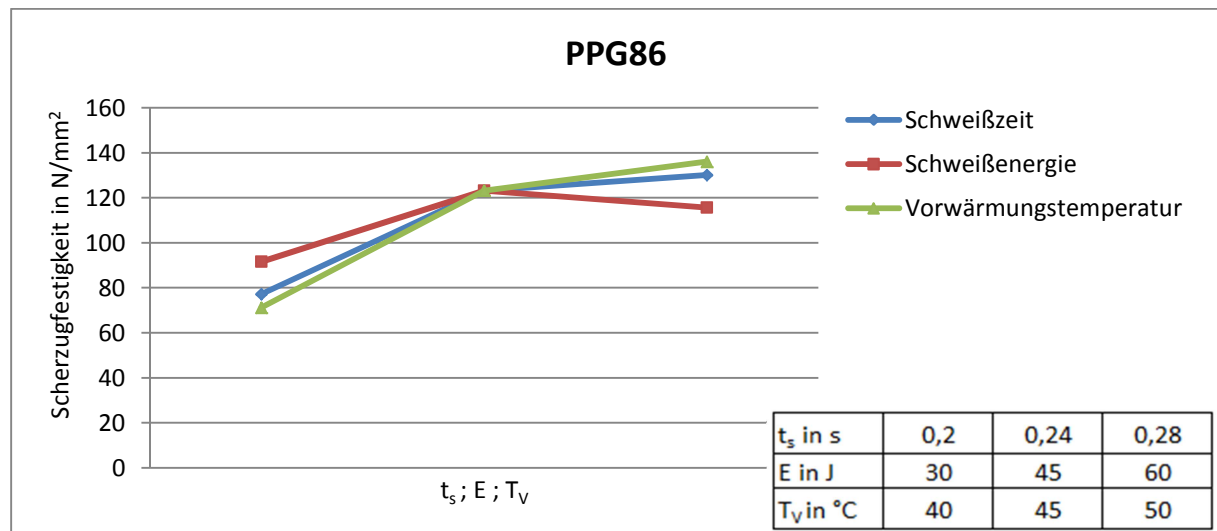


Abbildung 7.19: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße Scherzugfestigkeit bei PPG86

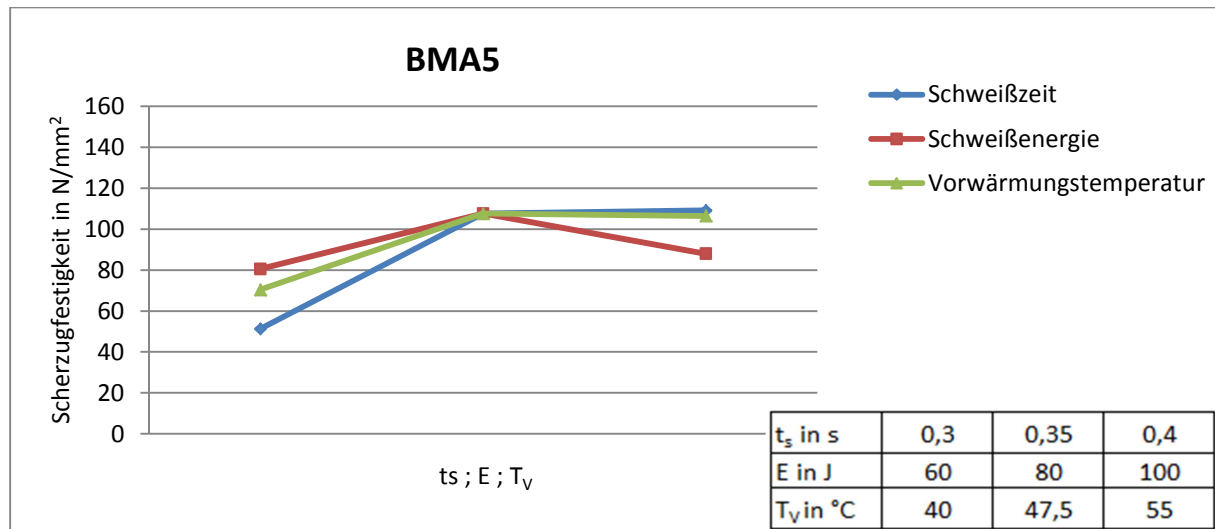


Abbildung 7.20: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße Scherzugfestigkeit bei BMA5

Bei PPG86 ist erkennbar, dass die Schweißzeit und Vorwärmungstemperatur den stärksten Einfluss haben. Bei Betrachtung der minimalen und maximalen Stufen steigt die Festigkeit von 77 auf 130 N/mm², bei Vorwärmungstemperatur hingegen von 71 auf 136 N/mm². Die Schweißenergie deutete auf einen geringen Einfluss im Bereich 91 bis 115 N/mm² hin. Bei BMA5 liegt der Festigkeitsbereich bei Variation der Schweißzeit mit 51 und 110 N/mm² sowie bei Änderung der Vorwärmungstemperatur zwischen 70 und 106 N/mm² deutlich geringer. Bei Betrachtung der Werte, unabhängig von den Zentrumsunkten, lässt sich bei der Schweißenergie ein flacher Abfall des Festigkeitsbereiches, im Gegenteil zu anderen Größen erkennen. Im vorherigen Kapitel wurde der Unterschied zwischen Soll- und Ist-Werten der Schweißenergie dargestellt. Damit lässt sich aus den Differenzen erkennen, dass die Steuerungsart der Ultraschallschweißanlage zu starken Schwankungen und somit zu unscharfer Beurteilung der Schweißenergie bei den Zielgrößen führt.

Aus diesem Ergebnis ist der Unterschied zwischen den Schmelzpunktbereichen der Kunststoff-Binder PP und PVDF der jeweiligen Compounds, also die Differenz zwischen dem ausgewählten T_v -Bereich und T_G , zu erkennen. Der erhöhte Graphitanteil um 1 Gew.-% bei BMA5 hat sich bei diesen Ergebnissen nicht erkennbar gemacht. Um diese Beobachtungen metallografisch darzustellen, wurde eine REM-Aufnahme an der Fügezone erstellt (Abbildung 7.21). Die beiden PPG-Proben unterscheiden sich nur durch die Schweißzeit, die BMA5-Platten hingegen durch die Schweißzeit und die Schweißenergie. Bemerkbar ist der Unterschied des Schmelzefluss und des Eintauchengrades des Netzes.

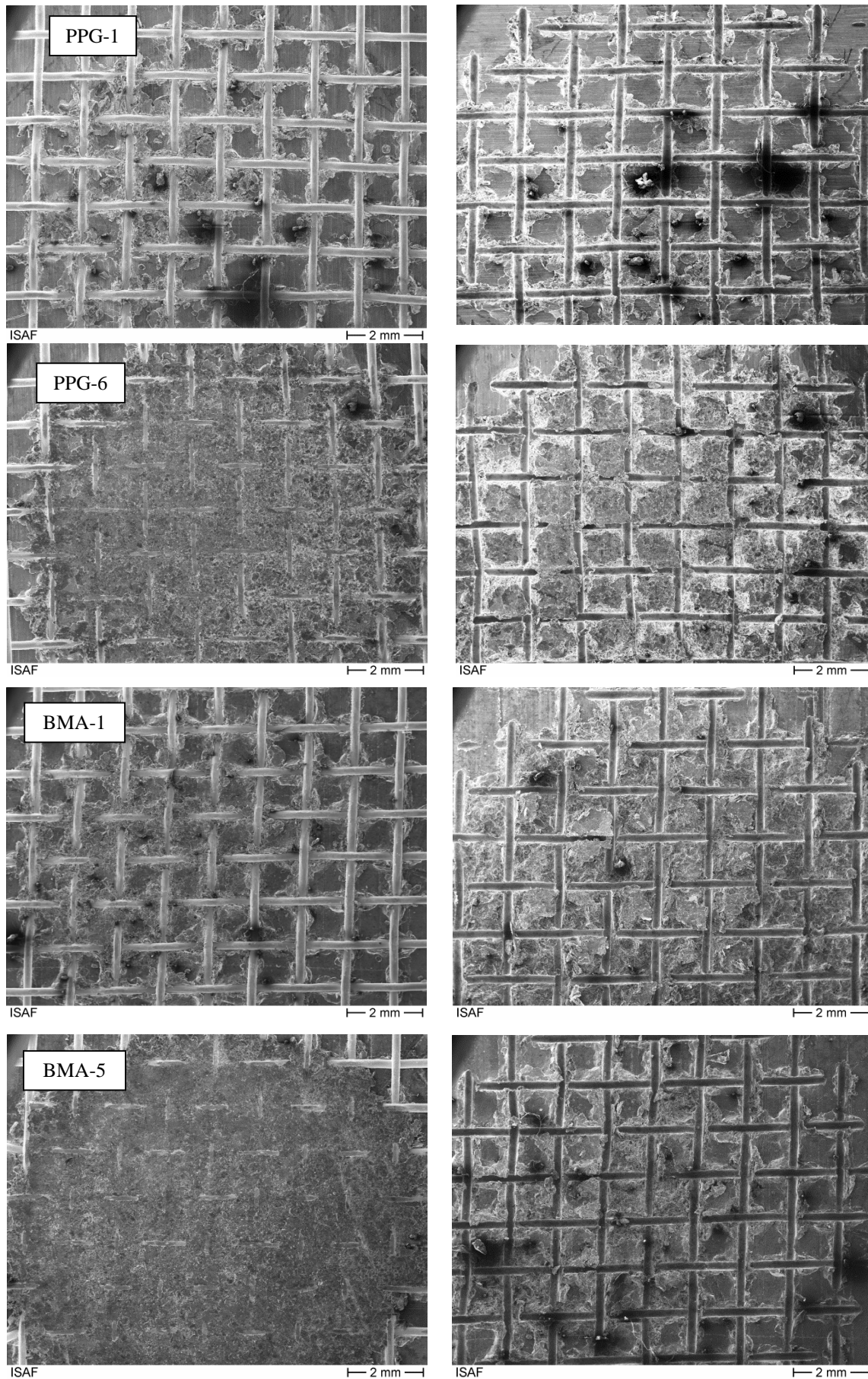


Abbildung 7.21: REM-Aufnahme der Fügezone vor und nach dem Scherzugversuch

In Abbildung 7.22 sind die Residuen, der durch den Versuch ermittelten Werte der Scherzugfestigkeit, der durch das Regressionsmodell berechneten Werte, gegenübergestellt. Diese werten die Güte des ausgewählten Modells aus. Bei den beiden Compounds weisen die Werte geringfügige Abweichungen auf. In beiden Fällen liegen jeweils drei Punkte außerhalb des 95%-Wahrscheinlichkeitsbereichs.

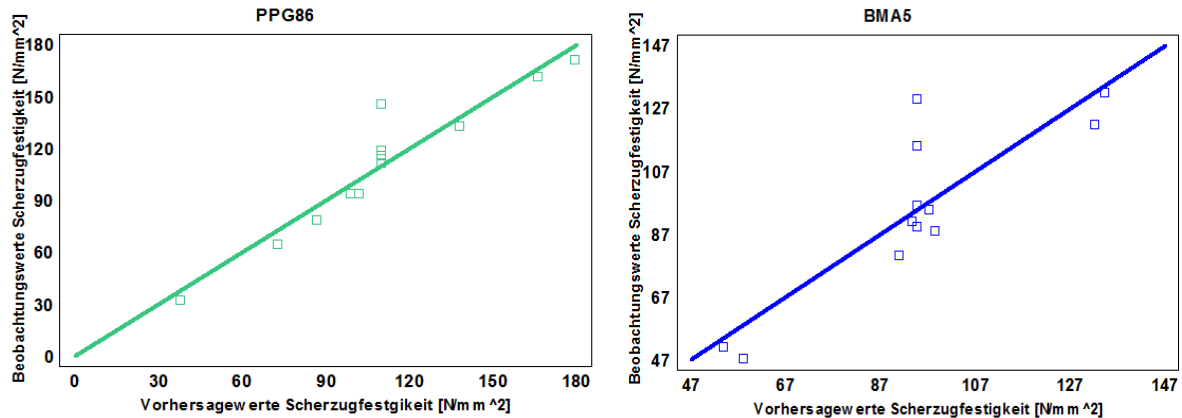


Abbildung 7.22: Gegenüberstellung der Erwartungs- und ermittelten Werte der Scherzugfestigkeit

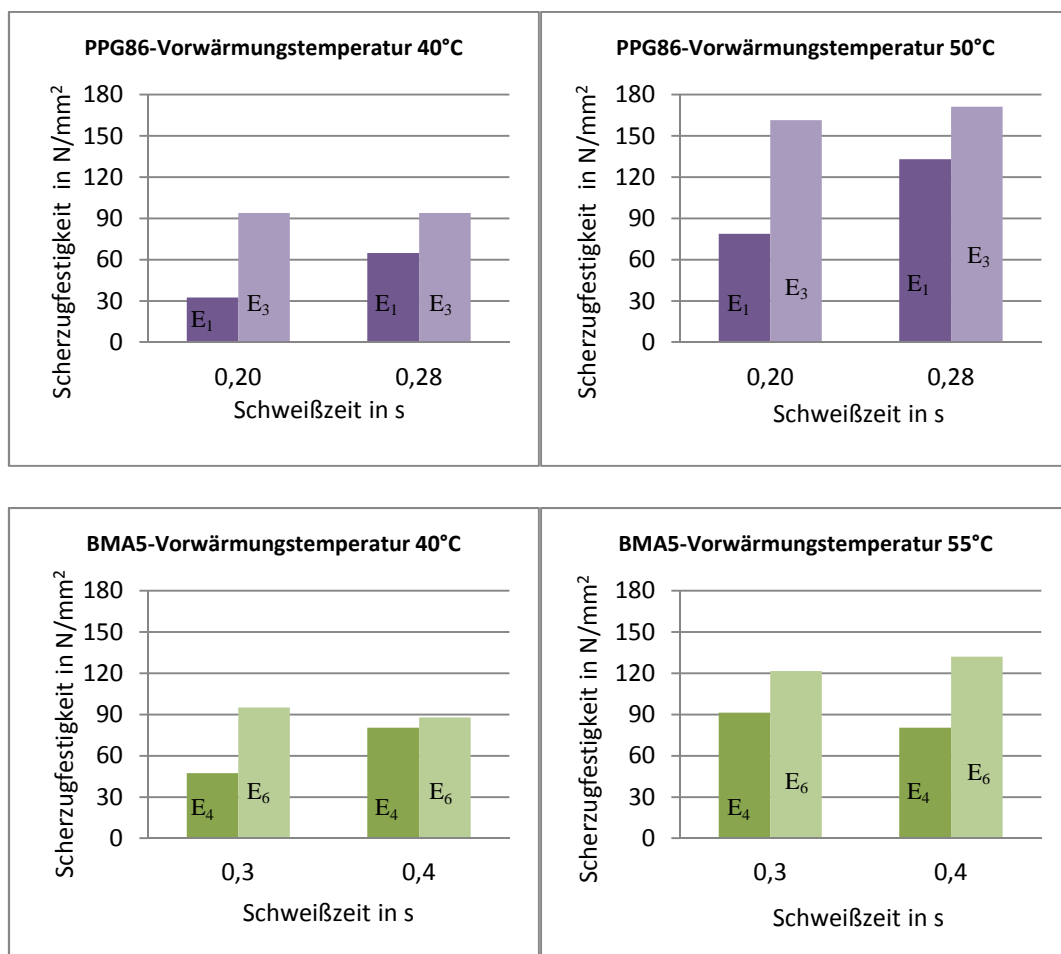


Abbildung 7.23: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Scherzugfestigkeit abhängig von der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur

In Abbildung 7.23 sind die Ergebnisse der Scherzugfestigkeit, in Abhängigkeit der Schweißzeit, bei PPG86 und BMA5 dargestellt. Die Werte sind unter Betrachtung der jeweiligen minimalen und maximalen Vorwärmungstemperatur angegeben. Jeder Balken in diesen und allen folgenden Diagrammen repräsentiert eine Probe aus dem Versuchsplan. Bei Betrachtung der minimalen Temperatur von 40 °C bei PPG86 lässt sich erkennen, dass zwei Proben mit 0,2 s geschweißt sind. Der einzige Unterschied ist die Schweißenergie. Bei beiden Compounds lässt sich hier auch eine Steigerung der Festigkeit mit steigender Schweißzeit und Temperatur erkennen. Beim Vergleich der gesamten Werte lassen sich deutlich kleinere Werte der PPG86 im Vergleich zu BMA5 feststellen.

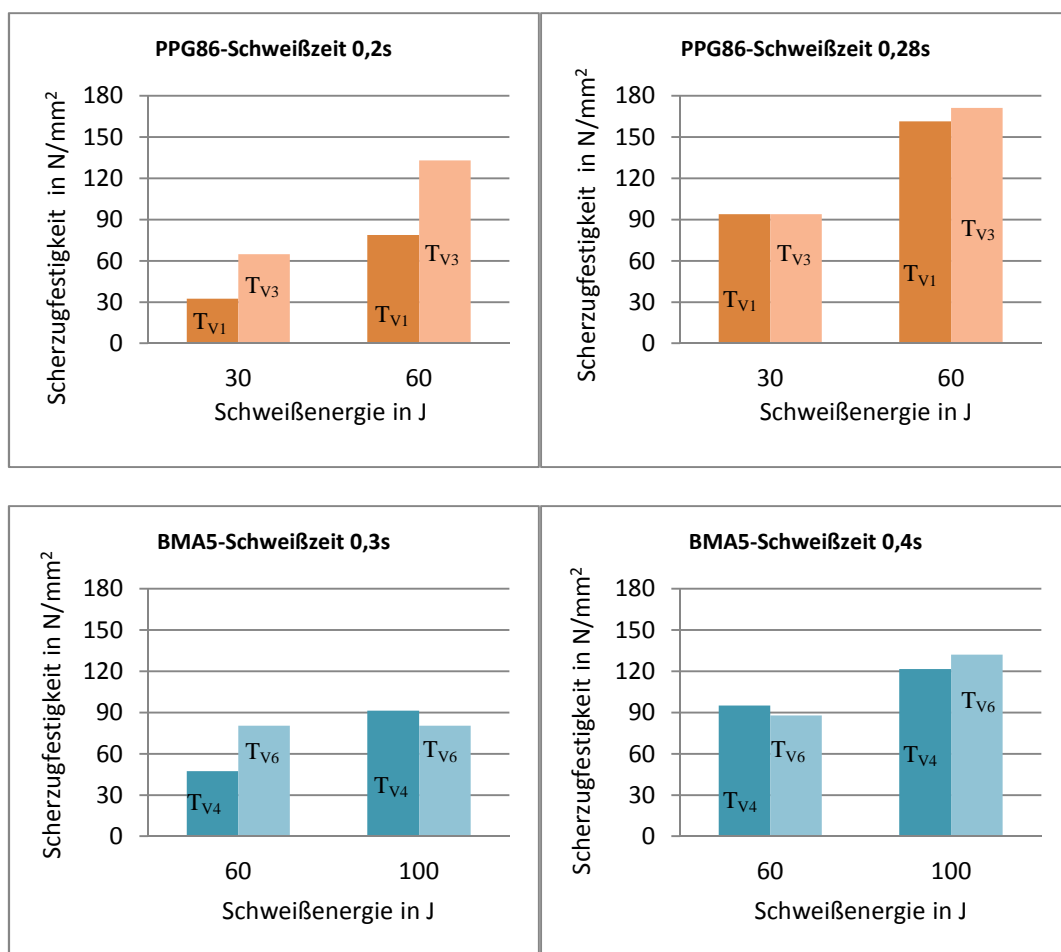


Abbildung 7.24: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Scherzugfestigkeit abhängig von der Schweißzeit und der Schweißenergie

Die Abhängigkeit zwischen Festigkeit und Schweißenergie unter Erfassung der Schweißzeit ist in Abbildung 7.24 abgebildet. Ebenfalls lassen sich bei PPG86 insgesamt höhere Werte ablesen. Die Erhöhung der Vorwärmungstemperatur hat bei 0,2 s zur 100-prozentigen Verbesserung der Schweißnahtfestigkeit geführt. Mit steigender Schweißzeit auf 0,28 s neigt die Schmelzebildung bei PPG86 dazu, die maximale Grenze zu erreichen. Das lässt sich durch

5 % maximalen Unterschiedes der Werte bei BMA5 erkennen. Die Differenz ist eher kleiner und beträgt bei 60 J maximal 60 %, während sie bei den restlichen Proben zwischen 10 und 15 % liegt.

7.8. Modellbildung für die Scherzugdehnung

Die Bewertung des Regressionsmodells und deren Bestimmtheitsmaße für die Scherzugdehnung sind in Tabelle 7.8 dargestellt.

	PPG86				BMA5			
Koeffizient	Schätzwert	Mittlere Quadr.	F Quotient	P Wert	Schätzwert	Mittlere Quadr.	F Quotient	P Wert
A:Schweißzeit	-164,69	18,36	143,07	0,0001	-18	2,53	12,59	0,0164
B:Schweißenergie	-0,21	1,41	10,96	0,0212	-0,19	1,36	6,77	0,0481
C:VT	-0,95	6,66	51,91	0,0008	-0,29	1,53	7,62	0,0398
AB	0,31	0,28	2,19	0,1988	0,18	0,28	1,4	0,29
AC	4,06	5,28	41,15	0,0014	0,3	0,1	0,5	0,5096
BC	0,00	0,55	4,3	0,0929	0,003	1,71	8,51	0,0331
$R^2 = 97,6742 \%$ R^2 (korrigiert für FG) = 94,8833 % Standardfehler der Schätzung = 0,358236 Mittl. Absolutfehler = 0,208333					$R^2 = 88,2077 \%$ R^2 (korrigiert für FG) = 74,0569 % Standardfehler der Schätzung = 0,44833 Mittl. Absolutfehler = 0,258333			

(2)

Tabelle 7.8: Regressionsmodell für die Scherzugdehnung in der Fügezone

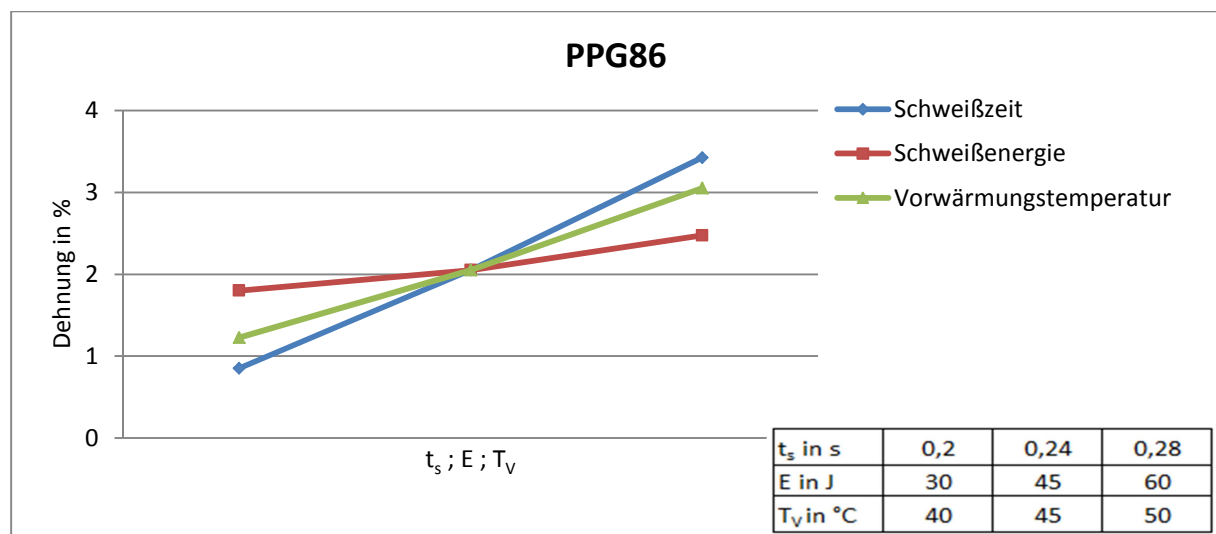


Abbildung 7.25: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße Scherzugdehnung bei PPG8

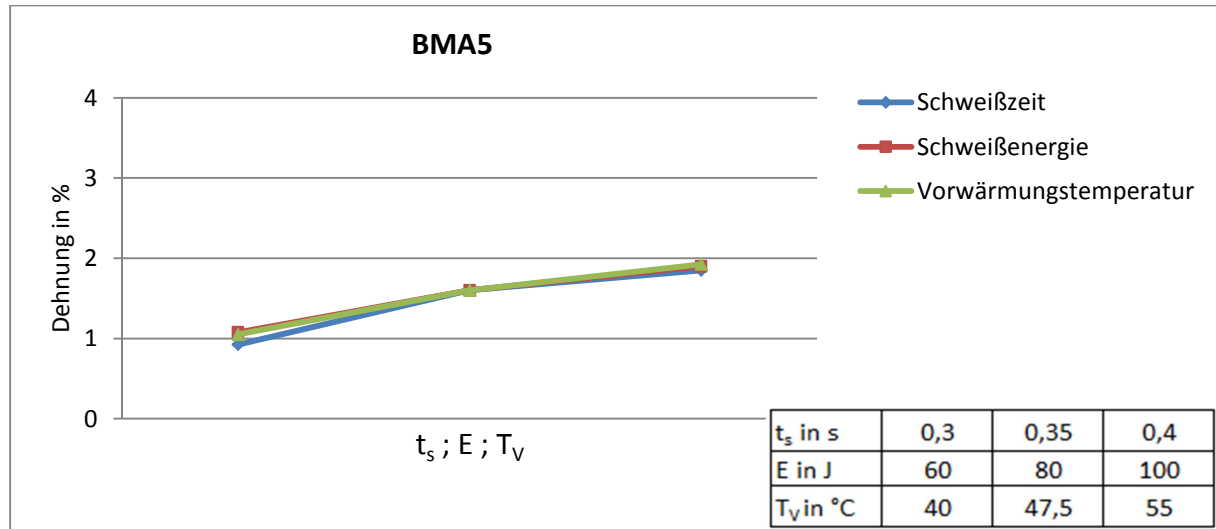


Abbildung 7.26: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße Scherzugdehnung bei PPG86

In Abbildungen 7.25 und 7.26 sind die Mittelwerte der gesamten Dehnung in der Schweißzone in Abhängigkeit aller Einflussparameter als Hauptfaktoren dargestellt. Im Gegensatz zur Bewertung der Schweißnahtfestigkeit nimmt die Dehnung bei zunehmenden Werten aller Faktoren ab. Dies ist aber bei PPG86 auffälliger als bei BMA5.

Ähnlich wie bei der Scherzugfestigkeit ist nur bei PPG86 wieder eine stärkere Prägung der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur erkennbar. Mit abgestufter Zunahme der Schweißzeit steigt die Dehnung bei PPG86 von 0,7 auf 3,5 %, bei Änderung der Temperatur von 1,2 auf 3 %. Die Energie hatte vergleichsweise den geringsten Einfluss und der gemessene Bereich lag zwischen 1,9 und 2,5 %. Die Werte des BMA5-Compounds waren relativ konstant und die Wichtung aller drei Faktoren war gleich. Somit ist der Dehnungsbereich zwischen 1 und 2 % konstant geblieben. Die niedrigeren Werte sind auf den kleineren E-Modul im Vergleich zu den beiden Compounds PP und PVDF zurückzuführen. Diese unterscheiden sich mit ca. 1000 MPa.

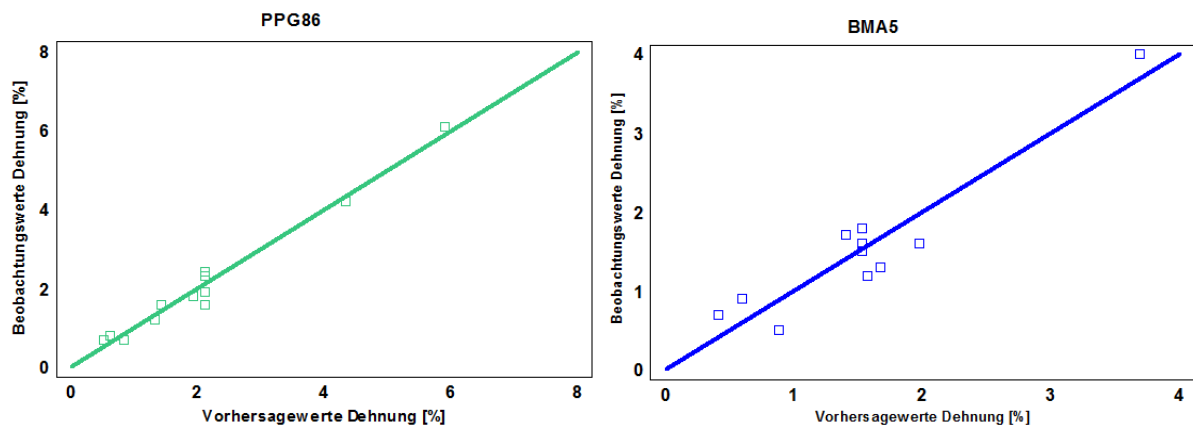


Abbildung 7.27: Gegenüberstellung der Erwartungs- und der ermittelten Werte der Scherzugfestigkeit

In Abbildung 7.27 sind die Residuen der gesamten Dehnung bei beiden Compounds aufgezeichnet. Die Messwerte weisen geringe und nicht tendenzielle Schwankungen im Vergleich zu den Erwartungswerten des Regressionsmodells auf.

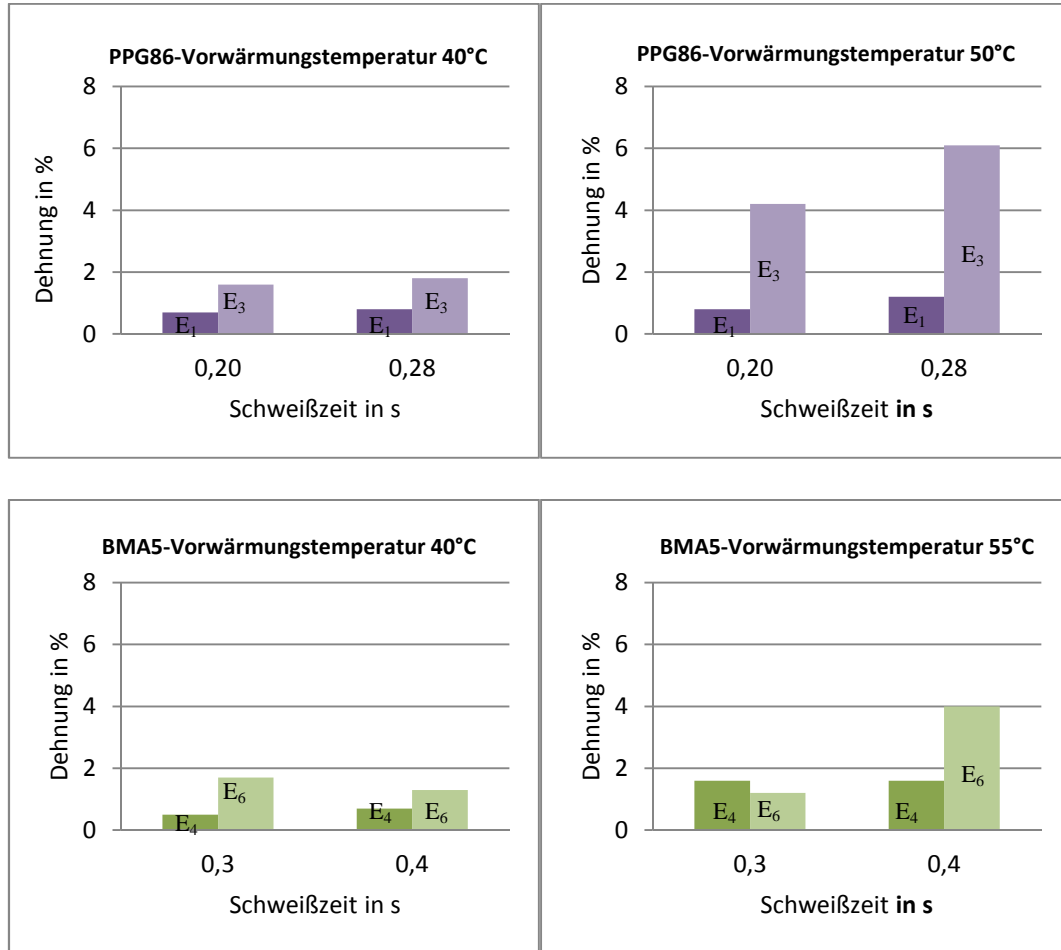


Abbildung 7.28: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Dehnung abhängig von der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur

In Abbildung 7.28 sind die Ergebnisse der gesamten Dehnung in Abhängigkeit der Schweißzeit und Vorwärmungstemperatur dargestellt. Bei einer Temperatur von 40 °C tendieren beide Compounds zu einem gleichen Dehnungsverhalten von maximal 1,9 % auch mit zunehmender Schweißzeit. Wird die Vorwärmungstemperatur auf den Maximalwert erhöht, so weist PPG86 eine Erhöhung bis auf 6 % auf. Während die BMA5-Platten bei einer Temperatur von 55 °C eine maximale Dehnung von 4% zeigten, lagen die Werte der restlichen drei Proben bei ca. 1,8 %. Die PPG86-Platten hingegen verhielten sich bei 50 °C nicht erwartungsgemäß schwankungsfrei, sondern wiesen große Unterschiede auf. Bei zwei Proben mit einer Schweißzeit von 0,2 und 0,28 s war der Unterschied ca. 450 %.

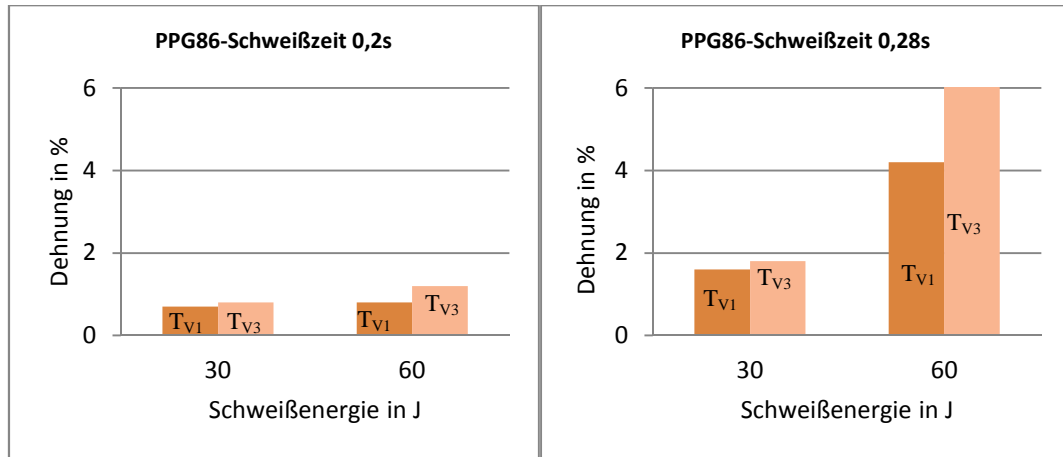


Abbildung 7.29: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Dehnung abhängig von der Schweißzeit und der Schweißenergie bei PPG86

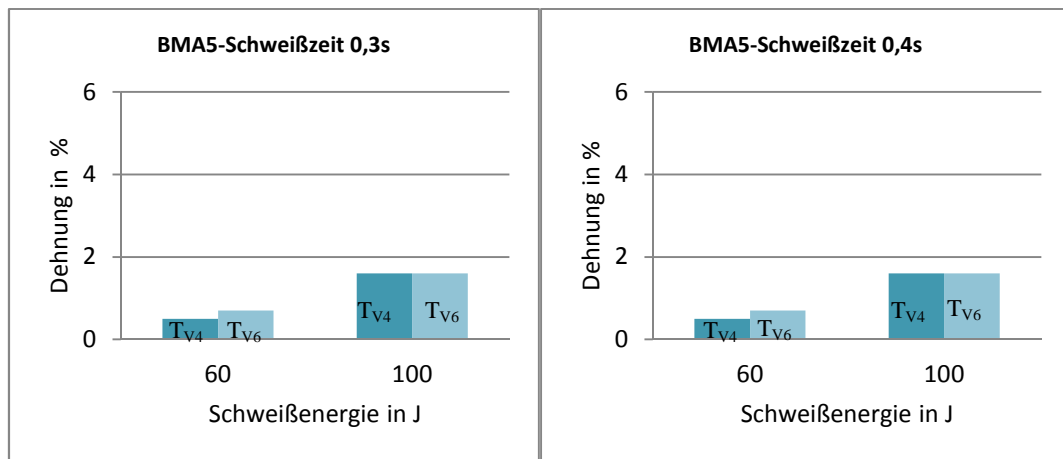


Abbildung 7.30: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Dehnung abhängig von der Schweißzeit und der Schweißenergie bei BMA5

In den Abbildungen 7.29 und 7.30 sind die Ergebnisse der Dehnung abhängig von der Schweißenergie und der Schweißzeit dargestellt. Bei der unteren Grenze der Schweißzeit schwankt der Dehnungsbereich der beiden Compounds zwischen 1 und 2 %. Eine Erhöhung auf den maximalen Wert bringt bei BMA5 kaum einen Unterschied mit sich, bei PPG86 hingegen eine Erhöhung auf 4 - 6%.

7.9. Messung des elektrischen Widerstandes

Die Messung des elektrischen Kontaktwiderstandes stellte nach der Scherzugfestigkeit die wichtigste messbare Zielgröße dieser Arbeit dar. Wie in der Zielstellung beschrieben, soll durch diese Untersuchungen der Kontaktwiderstand zwischen Stromkollektor und graphithaltiger Gasverteilerplatte reduziert und somit eine neue Dimension im Bereich Brennstoffzellen eröffnet werden. Die Messmethode des elektrischen Widerstandes wurde in

Kapitel 5.2 ausführlich beschrieben. Zur Verdeutlichung wird in Abbildung 5.3 der Verlauf der Strom- und Spannungsabfälle in der Fügezone dargestellt.

Durch diese Messmethode wird eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich der Druckeinstellung in der Druckvorrichtung und bei Messung des elektrischen Widerstandes mit minimaler Tolaranzabweichung erreicht. Die eingesetzte Methode bei den Voruntersuchungen ist neben der erforderlichen Lötung jeder Probe mit großen Toleranzen verbunden. Dazu könnte der Einsatz der Isolatoren zwischen den Metallnetzen und der Graphit-Compound-Platte zur Verfälschung der Ergebnisse beitragen. Aus diesem Grund wurde diese effizientere und aussagekräftigere Methode eingesetzt. Der Kupferbolzen hat dieselbe Spitzenform wie die Sonotrode und kann mit hoher Genauigkeit in der Fügezone sitzen. Bei allen Proben wurde die Fügezone mit Schmirgelpapier geschliffen, damit der Kupferbolzen direkten Kontakt zum Metallnetz hat.

Die Messung des Kontaktwiderstandes ist in mehreren Phasen abgelaufen. Die für den Versuchsplan ausgewählten Proben wurden zunächst ohne metallischen Partner gemessen. Davor wurde der Kontaktwiderstand zwischen dem Kupferbolzen und der Kupferplatte gemessen, bei Variation des Drucks im Bereich von 0,1 bis 0,7 N/mm². Die Werte schwankten je nach Druckerhöhung zwischen 1 und 10 mΩ bei einem vom Resistomat automatisch eingestellten Messstrom von 10 A und einem elektrischen Widerstand von 20 mΩ (Abbildung 7.31).

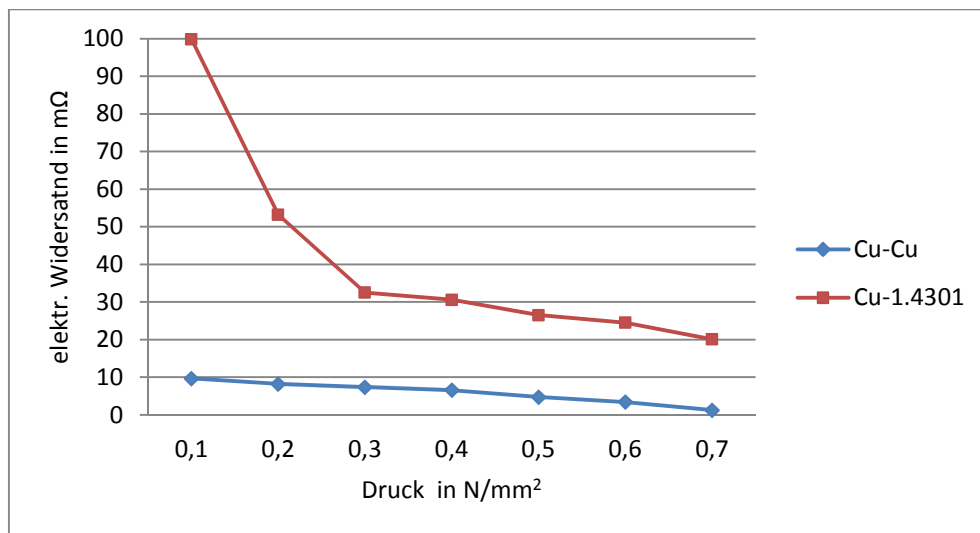


Abbildung 7.31: Gemessene Werte des elektrischen Widerstandes zwischen Kupferbolzen und Kupferplatte

Diese Werte liegen im Bereich des für den Kontaktwiderstand von Kupfer bekannten Wert aus der Literatur. Zur weiteren Prüfung der Genauigkeit des Messsystems wurde der elektrische Widerstand eines 30 x 30-Edelstahlnetzes bei denselben Druckabstufungen

gemessen. In diesem Fall ist auch der Widerstand kontinuierlich im Bereich von 100 m Ω bei einer Drucksteigerung. In der zweiten Phase der Messungen wurden die zwölf Graphit-Compounds-Platten nach diesem Ablauf gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.32 dargestellt. Bei Betrachtung der beiden Ergebnisse lässt sich feststellen, dass in allen Fällen bei zunehmendem Druck eine Reduzierung des elektrischen Widerstandes stattgefunden hat. Bei der Messung der elektrischen Leitfähigkeit wurde eine Abweichung festgestellt. Dies ist auf die Graphitstruktur und die Entstehung von Anhäufungen an der Oberfläche zurückzuführen.

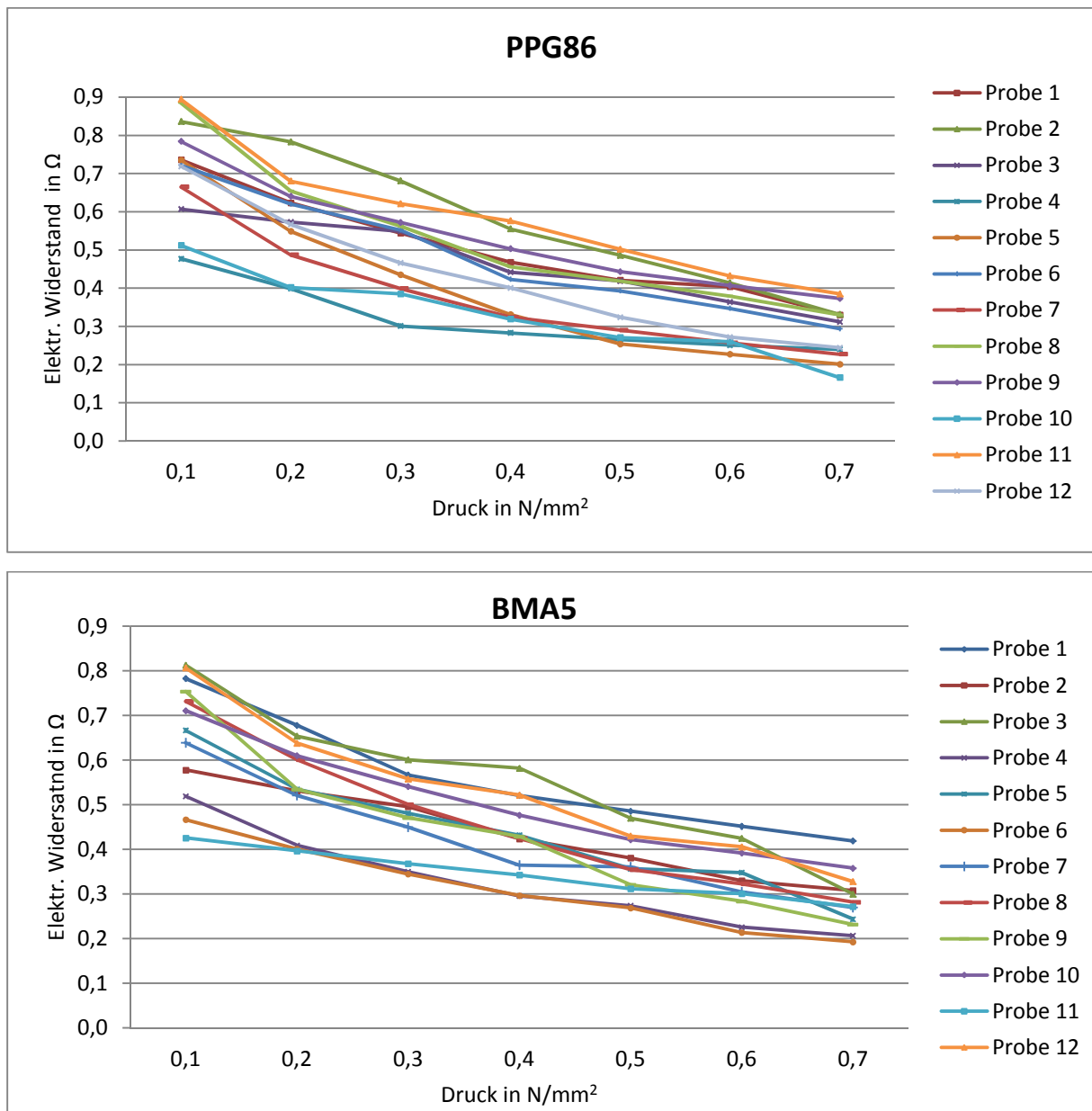


Abbildung 7.32: Gemessene Werte des elektrischen Widerstandes an zwölf PPG86/BMA5-Platten

Bei den PPG86-Platten variieren die Widerstandswerte bei minimalem Druck zwischen 0,5 und 0,9 Ω . Mit zunehmendem Druck sinken die Werte stufenweise und erreichen ein Intervall

zwischen 0,2 und 0,4 Ω . Das ist ebenfalls die Situation bei BMA5, indem die Anfangswerte 0,4 und 0,8 Ω einen Bereich von 0,2 bis 0,4 Ω erreichen. Zwar liegen diese Werte deutlich über den Herstellerangaben, aber eine genau Beschreibung der Messmethode der Hersteller liegt nicht vor. Obwohl PPG86 einen geringeren Graphitanteil als BMA5 von 1 % hat, können die minimalen Unterschiede der Werte von beiden Werkstoffen eher mit hervorgerufenen Messtoleranzen begründet werden.

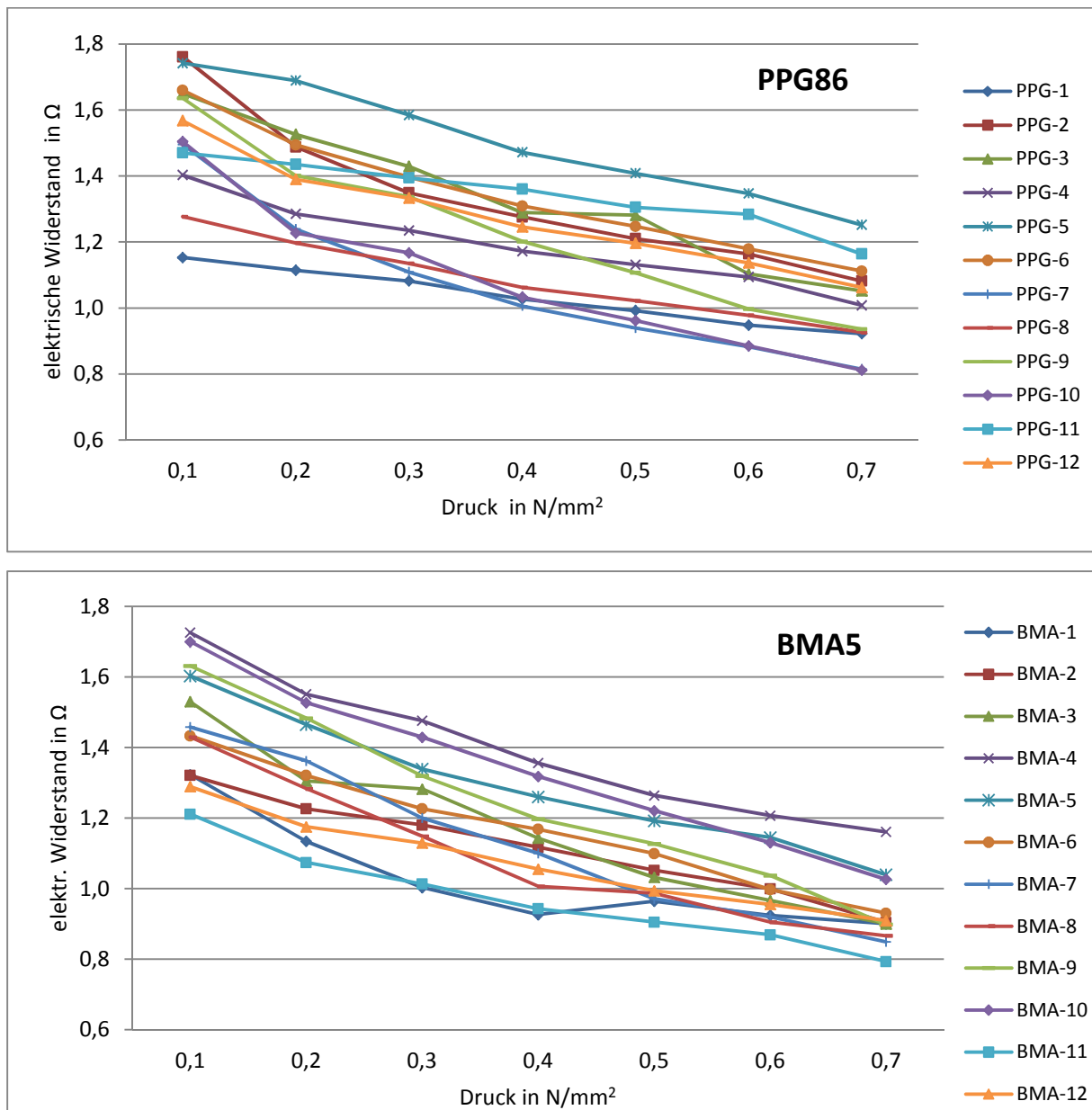


Abbildung 7.33: Werte des elektrischen Widerstandes an zwölf PPG86/BMA5-Platten mit aufgelegtem Metallnetz

Ebenfalls wurde vor dem Schweißbeginn nach gleicher Systematik der elektrische Kontaktwiderstand zwischen Compound-Platten mit einem aufgelegten Metallnetz bestimmt. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Abbildung 7.33 dargestellt. Bemerkbar sind die höheren Widerstandswerte bei beiden Materialien im Vergleich zur vorherigen Messung.

Das Auflegen des Metallnetzes hat aufgrund seiner Form und elektrischen Eigenschaften zu ohmschen Verlusten in der Compoundplatte geführt. Dies ist genau bei Brennstoffzelle der Fall, da nämlich die Kontaktierung des Stromkollektors an der Gasverteilerplatte zu diesen Verluste und damit zur Leistungsminderung der Brennstoffzelle führt.

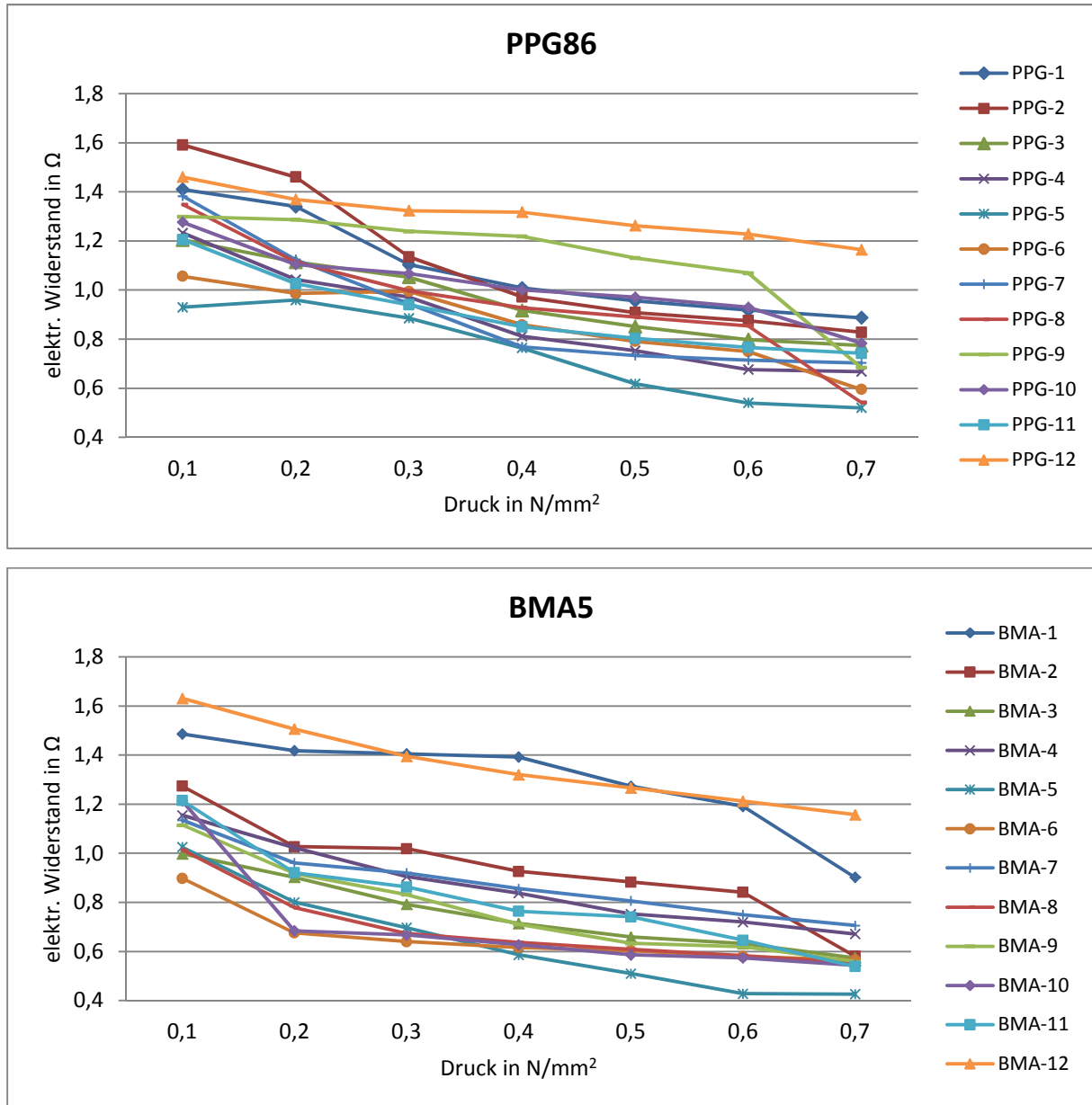


Abbildung 7.34: Werte des elektrischen Widerstandes an 12 PPG86/BMA5-Platten geschweißt mit Metallnetz

Bei Betrachtung der Ergebnisse lässt sich erkennen, dass hier ebenfalls mit Druckzunahme die Werte permanent sinken. Bei den beiden Compounds lagen die aufgenommenen Werte im Bereich 1,2 - 1,7 Ω bei 0,1 N/mm² und stiegen auf 1,3 bis 0,8 Ω bei 0,7 N/mm² an.

In Abbildung 7.34 sind die Ergebnisse der mit Ultraschall geschweißten Verbunde dargestellt. Bei den PPG86-Compounds lagen die aufgenommenen Werte im Bereich von 0,9 - 1,6 Ω bei

0,1 N/mm² und stiegen auf 1,3 bis 0,4 Ω bei 0,7 N/mm². Bei BMA5 hingegen lagen die Werte im Bereich 0,9 - 1,6 Ω bei 0,1 N/mm² und stiegen auf 1,2 bis 0,3 Ω bei 0,7 N/mm. Zu erkennen ist, dass die Proben mit der niedrigeren Schweißzeit und Schweißtemperatur vergleichsweise nah an den Proben mit aufgelegten Netzen sind. Je höher die Schweißparameter sind, desto geringer sind die Werte. Hierfür erreichen diese bei einem Druck ab 0,5 N/mm² die Werte der Graphit-Compounds. Bei Betrachtung der zwölf Proben insgesamt lässt sich erkennen, dass das Ultraschallschweißen eine deutliche Verbesserung des elektrischen Widerstandes im Vergleich zur Variante mit aufgelegten Netzen mit sich bringt.

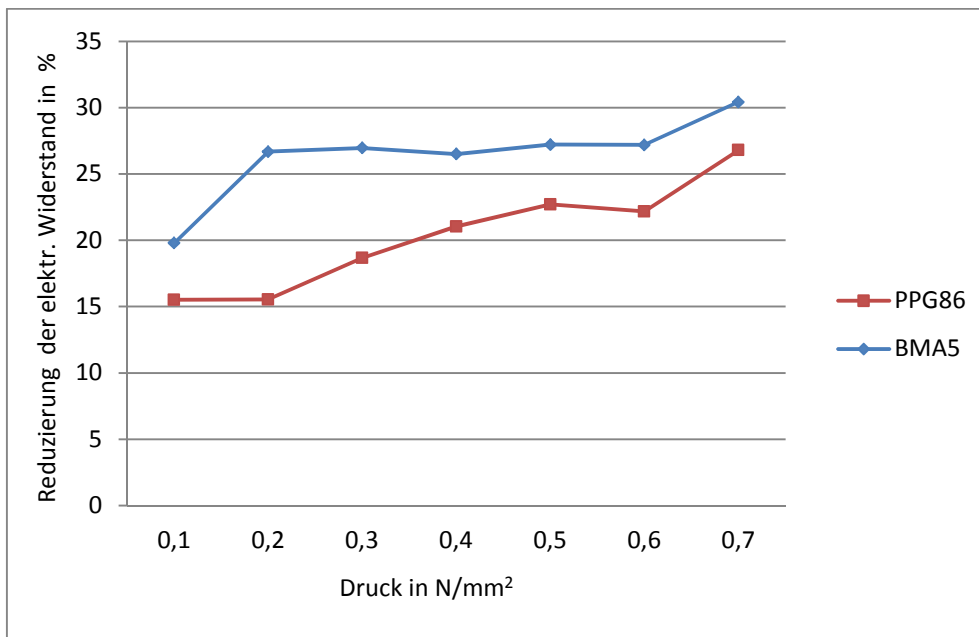


Abbildung 7.35: Reduzierung des elektrischen Widerstandes im Vergleich beim Ultraschallschweißen von Netzen mit Graphit-Compound im Vergleich

Das Reduzierungspotenzial des elektrischen Widerstandes bei beiden Compounds ist prozentual abhängig vom Druck in Abbildung 7.35 dargestellt. Diese Werte beziehen sich auf die Mittelwerte der gemessenen elektrischen Widerstände bei den zwölf Proben des Versuchsplans, bei dem eingestellten mechanischen Druck.

In beiden Fällen lässt sich eine Verbesserung erkennen, die bei PPG86 ab 15 % beginnt und sich mit Druckzunahme auf 28 % erhöht. Bei BMA5 beginnt die Verbesserung bei 0,1 N/mm² bei 20 % und erreicht bei 0,7 N/mm² einen Wert von 32 %.

7.10. Modellbildung für den elektrischen Widerstand

Die Bewertung des Regressionsmodells und deren Bestimmtheitsmaße für den elektrischen Widerstand sind in Tabelle 7.9 dargestellt.

Koeffizient	PPG86				BMA5			
	Schätzwert	Mittlere Quadr.	F Quotient	P Wert	Schätzwert	Mittlere Quadr.	F Quotient	P Wert
A:Schweißzeit	-5,60	0,10	7,5	0,0409	-1,005	0,14	6,69	0,0491
B:Schweißenergie	0,05	0,01	0,96	0,373	0,05	0,0006	0,03	0,8682
C:VT	-0,02	0,05	3,47	0,1214	0,045	0,02	0,98	0,3685
AB	-0,09	0,02	1,74	0,2446	-0,04	0,019	0,88	0,3903
AC	0,14	0,01	0,43	0,539	0,04	0,002	0,11	0,7496
BC	0,00	0,02	1,31	0,3043	-0,0008	0,134	6,15	0,0558
$R^2 = 78,9273 \%$ R^2 (korrigiert für FG) = 53,6401 % Standardfehler der Schätzung = 0,118012 Mittl. Absolutfehler = 0,0708333					$R^2 = 74,8062 \%$ R^2 (korrigiert für FG) = 44,5736 % Standardfehler der Schätzung = 0,147791 Mittl. Absolutfehler = 0,0913333			

(3)

Tabelle 7.9: Regressionsmodell für die elektrische Widerstand in der Fügezone

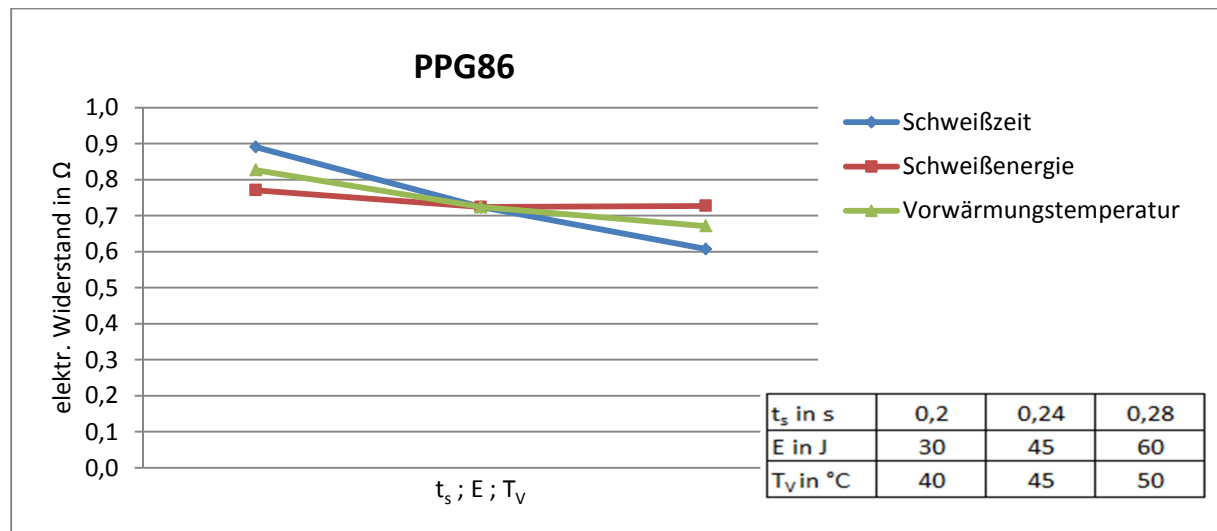


Abbildung 7.36: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße elektrischer Widerstand bei PPG8

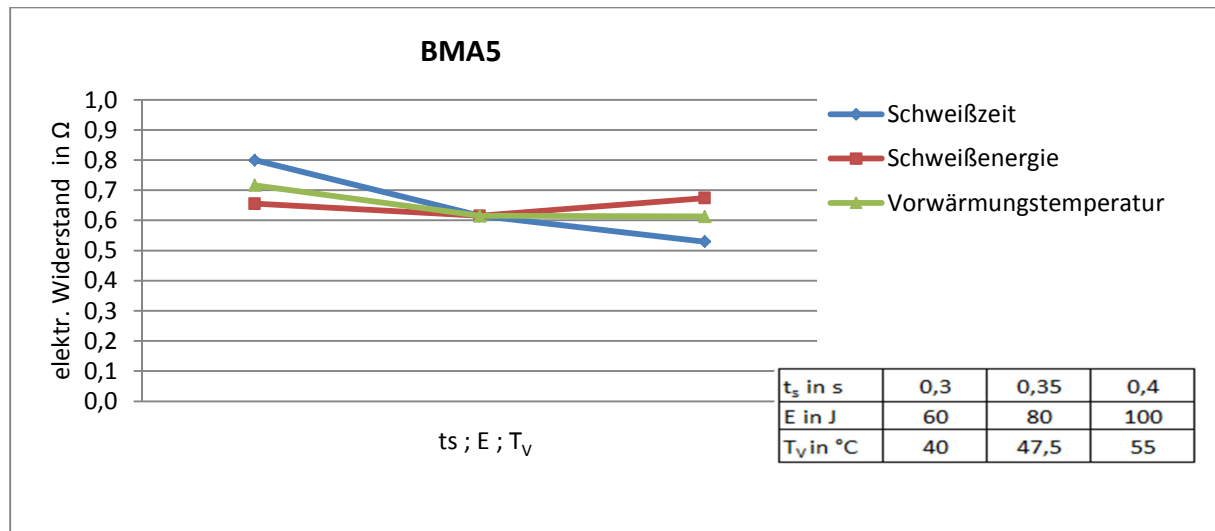


Abbildung 7.37: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße elektrischer Widerstand bei BMA5

In Abbildungen 7.36 und 7.37 ist die Darstellung aller Haupteffekte auf die Mittelwerte der Zielgröße Scherzugfestigkeit, bei beiden Graphit-Compounds, abhängig vom Einstellbereich der gesamten Parameter dargestellt. Jede Einflussgröße hatte drei Stufen, inklusive Zentrumsunkt.

Bei diesen durchgeführten Messungen lässt sich der hohe Einfluss der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur auf die Senkung des elektrischen Widerstandes erkennen. Sowohl bei PPG86 als auch bei BMA5 sinkt diese Zielgröße mit steigenden Parameterwerten. In beiden Fällen hat die Schweißenergie ebenfalls wie bei den vorherigen Untersuchungen den schwächsten Einflussfaktor präsentiert. Dabei sind die Werte ähnlich konstant geblieben.

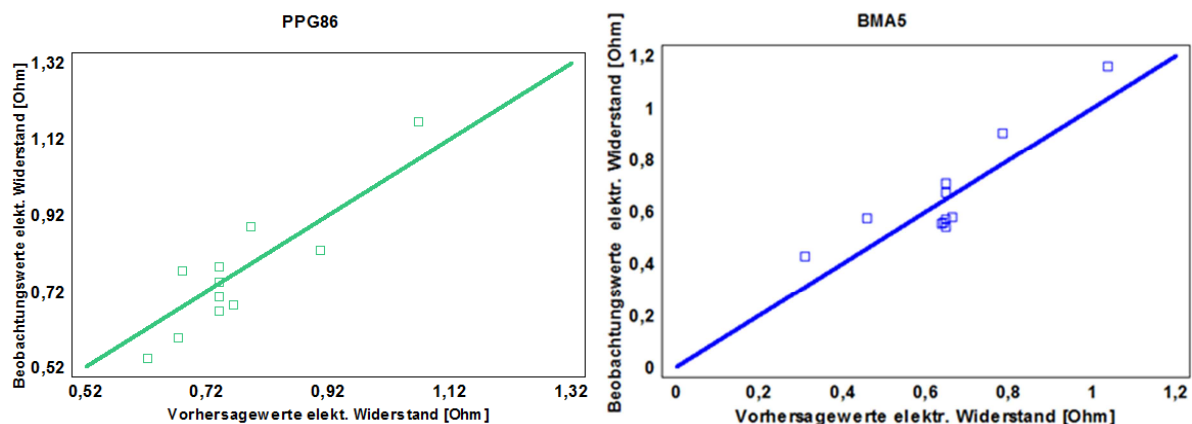


Abbildung 7.38: Gegenüberstellung der Erwartungs- und ermittelten Werte des elektrischen Widerstandes

In Abbildung 7.38 sind die Residuen des elektrischen Widerstandes bei beiden Compounds aufgezeichnet. Die Messwerte weisen geringe, nicht tendenzielle Schwankungen im Vergleich zu den Erwartungswerten des Regressionsmodells auf.

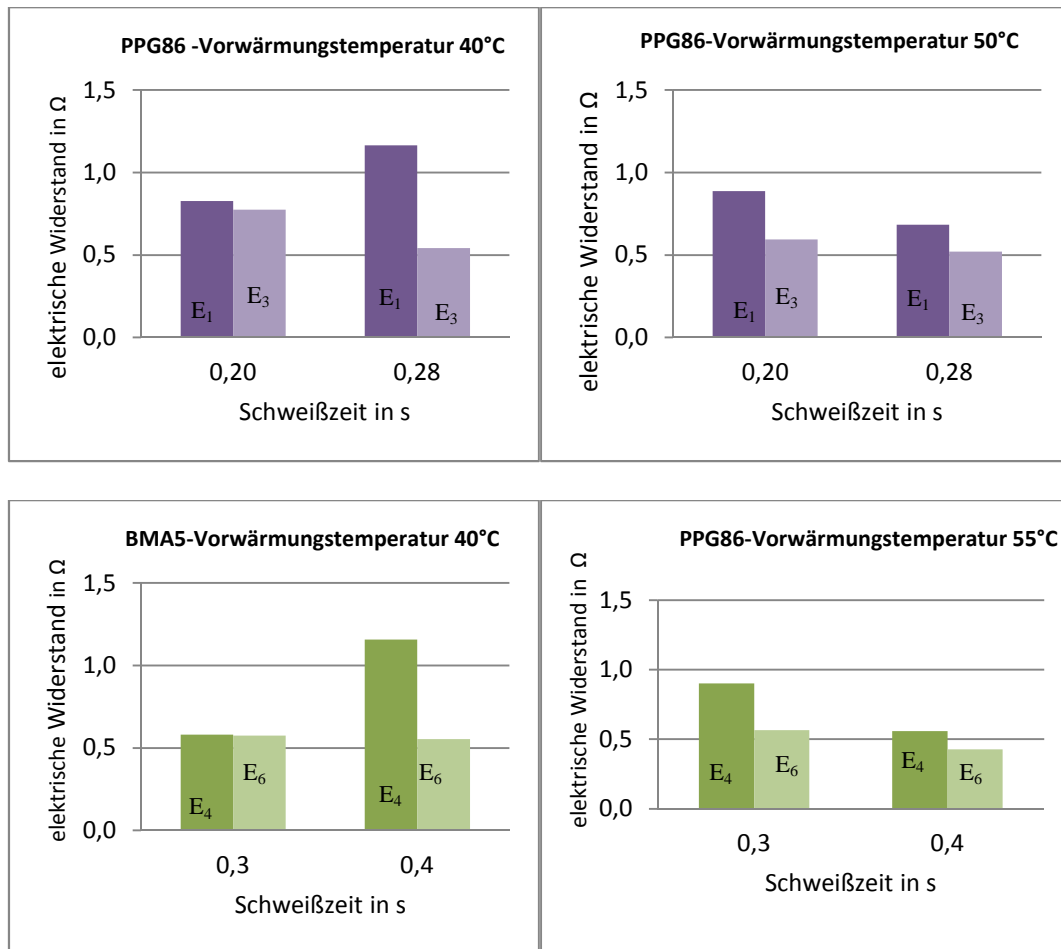


Abbildung 7.39: Gegenüberstellung der Ergebnisse der elektrischen Widerstände abhängig von der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur

In Abbildung 7.39 sind die Ergebnisse des elektrischen Widerstandes abhängig von der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur dargestellt. Bei 40 °C ist bei 75 % der Probe eine kleine Senkung des Widerstandes ersichtlich. Die Erhöhung der Schweißenergie hat den Widerstand um ca. 10 % verbessert. Dadurch lässt sich die geringe Wirkung der Schweißenergie auf die Schweißungen und auf alle Zielgrößen erkennen.

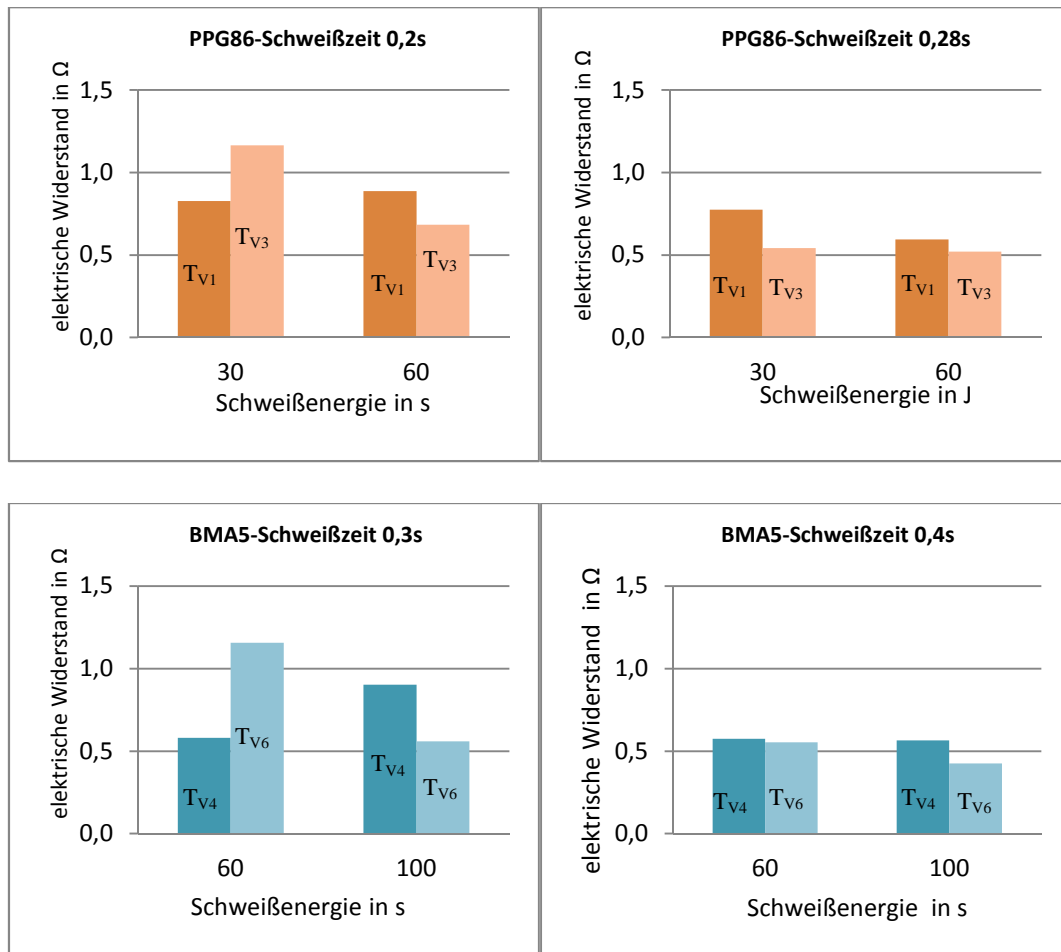


Abbildung 7.40: Gegenüberstellung der Ergebnisse der elektrischen Widerstände abhängig von der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur bei BMA5

Bei Betrachtung der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Schweißenergie und der Vorwärmungstemperatur (Abbildung 7.40), ist zu erkennen, dass steigende Schweißzeiten und Vorwärmungstemperaturen bei beiden Compounds zur Minderung des elektrischen Widerstandes führen. In beiden Fällen beträgt die Reduzierung zwischen 10 und 20 %. Parallel zu diesen Messungen wurde mittels Siemens-D5000-Diffraktometers eine XRD-Analyse des Edelstahlgeflechtes am Institut für Werkstoffkunde und Werkstofftechnik vor und nach der Schweißung (Probe PPG-1) durchgeführt. Dies sollte eine mögliche Bildung von Reaktionprodukten, beziehungsweise martenistischer Umwandlung, nachweisen. Da bei den Untersuchungen keine solchen Reaktionen nachgewiesen werden konnten, ist davon auszugehen, dass die Ultraschallschweißverfahren die chemischen Eigenschaften des Edelstahl-Substrates nicht beeinflussen. Wäre dies der Fall, so wären weitere Untersuchungen zu Feststellung einer Abhängigkeit zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und möglichen Umwandlungen sinnvoll.

Bei Zusammenfassung der mechanischen, elektrischen und metallografischen Untersuchungen der nach dem Versuchsplan geschweißten Proben, ist die stärkere Wirkung der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur als Schweißparameter gegenüber der Schweißenergie ersichtlich. Mit Erhöhung der Prozessgrößen hat sich die Schweißnahtfestigkeit erhöht, ebenso die Scherzugdehnung in der Fügezone. Eine gleichmäßige Einbettung des Metallnetzes in der Fügezone wird durch Schliffbilder deutlich. Der elektrische Widerstand ist ebenfalls kontinuierlich bei Steigerung der Schweißnahtfestigkeit gesunken und erreichte beim maximalen Druck den elektrischen Widerstand des Graphit-Compounds.

Eine Verbesserung gegenüber aufgelegten Metallnetzen auf der Compoundplatte ist im Bereich 15 - 30 % nachgewiesen.

7.11. Optimierung des Schweißprozesses

Als Ziel der Optimierung war die Scherzugfestigkeit und die Dehnung zu maximieren sowie die Minimierung des elektrischen Widerstandes.

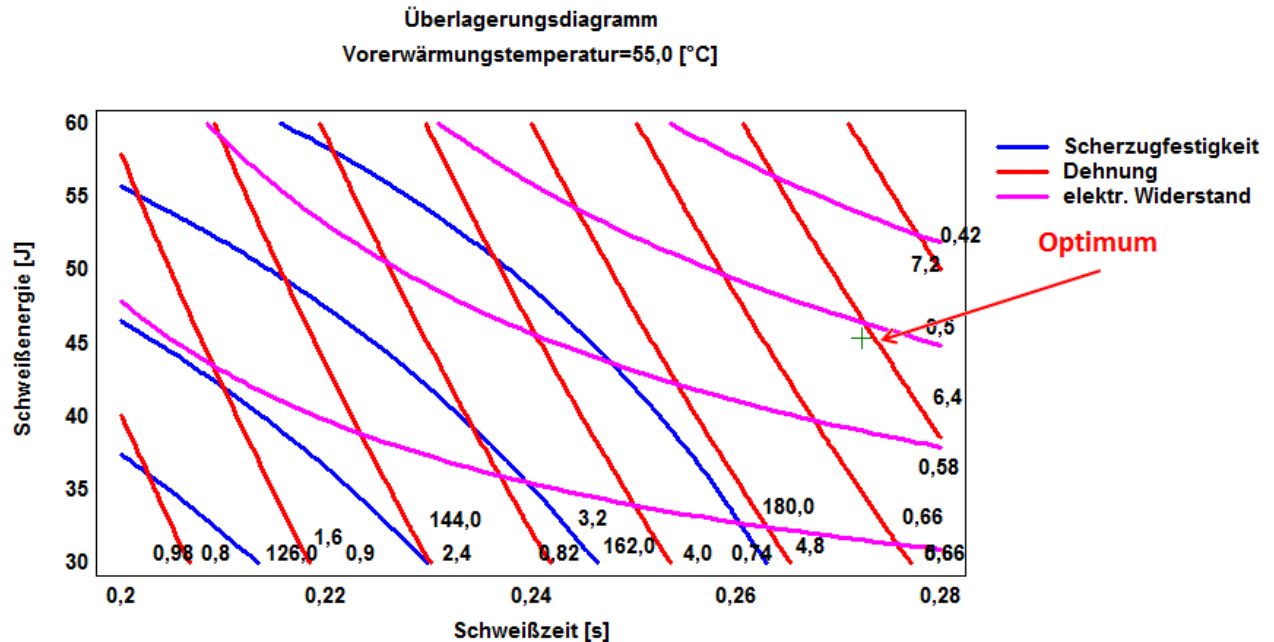


Abbildung 7.41: Ergebnisse der Optimierung der Zielgrößen bei PPG86 bei optimaler Vorwärmungstemperatur

In beiden Fällen haben sich die maximalen Werte der Einflussgrößen aufgrund der extrem geringen Druckfestigkeit der Graphit-Compounds als Optimum etabliert. Die optimierten Werte bei PPG86 sind sehr nah an den Proben PPG-5 und PPG-66. Diese unterscheiden sich nur durch die Einstellbereiche der Schweißenergie um 30 J.

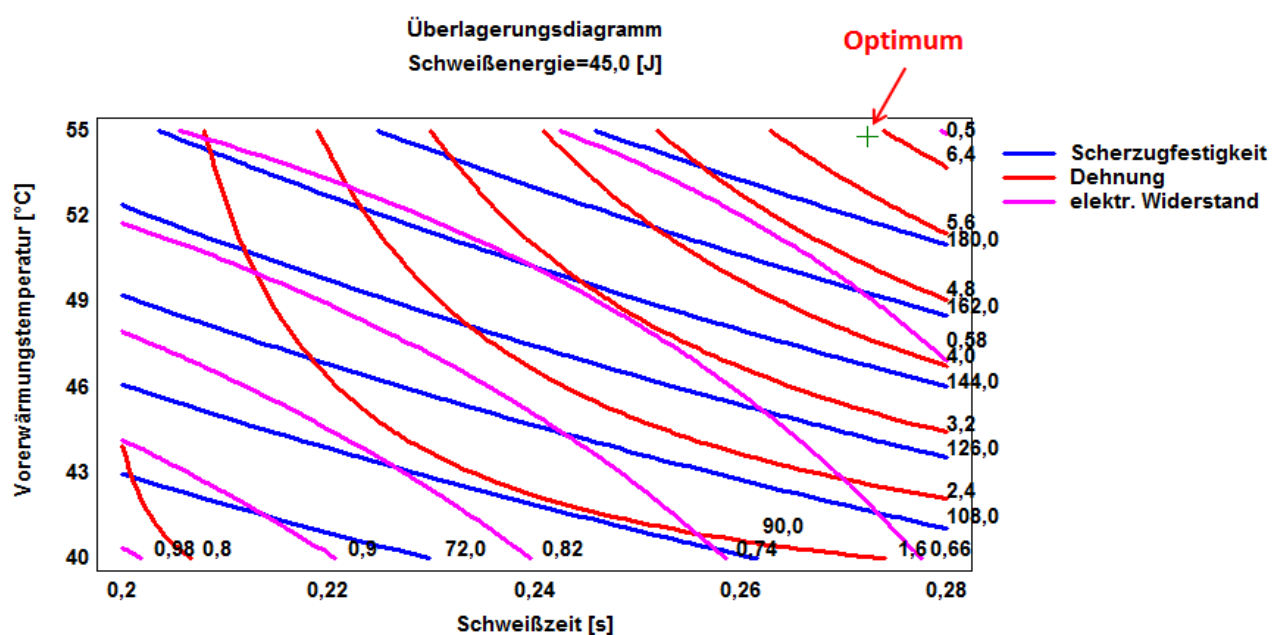


Abbildung 7.42: Ergebnisse der Optimierung der Zielgrößen bei PPG86 bei optimaler Schweißenergie

Bei BMA5 entsprechen die optimierten Werte den Einflussfaktoren der maximalen Werte des jeweiligen Einstellbereichs. Das Optimum der Zielgröße ist nah an der Probe BMA5-5. Die grafische Darstellung der Optima der Zielgrößen bei PPG86 und BMA5 in Abhängigkeit der optimierten Einflussparameter ist in den Abbildungen 7.41 - 7.44 dargestellt.

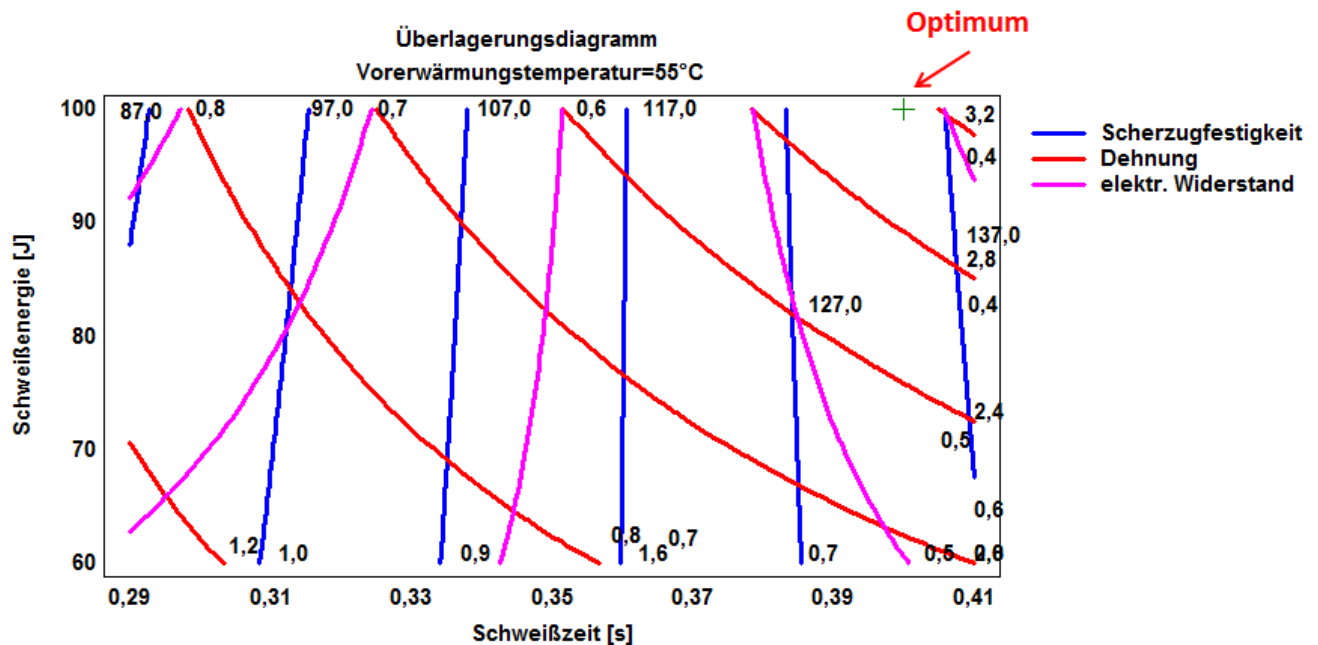


Abbildung 7.43: Ergebnisse der Optimierung der Zielgrößen bei BMA5 bei optimaler Vorerwärmungstemperatur

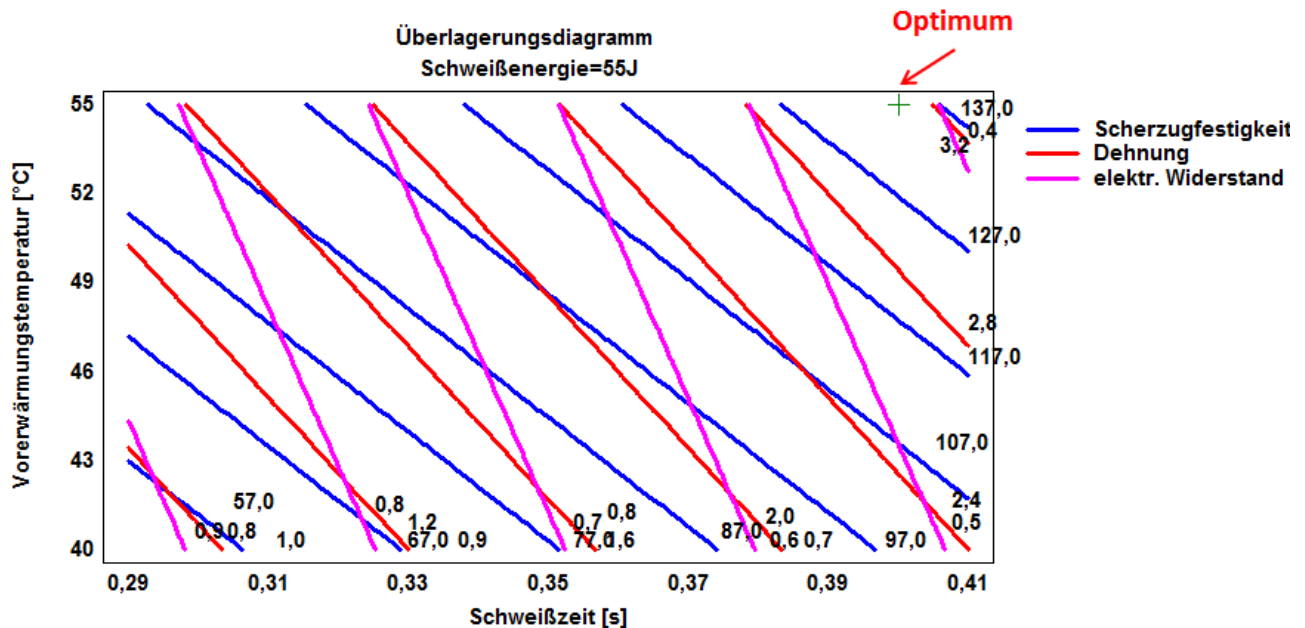


Abbildung 7.44: Ergebnisse der Optimierung der Zielgrößen bei BMA5 bei optimaler Schweißenergie

7.12. Messung der Temperatur-und Wärmeleitfähigkeit

Die Messung der Temperaturleitfähigkeit beziehungsweise Wärmediffusivität am Institut für Elektrochemie steht im Mittelpunkt der thermischen Untersuchung eines neu entwickelten Compounds. Sie steht in linearer Abhängigkeit mit der thermischen Leitfähigkeit und somit kann eine Aussage über die thermische Leitfähigkeit getroffen werden. Sie errechnet sich aus der Multiplikation der Dichte, der spezifischen Wärmekapazität und der gemessenen Temperaturleitfähigkeit. Dies ist eine materialcharakterisierende Eigenschaft zur Beschreibung der Fähigkeit, eine Temperaturänderung hinzunehmen beziehungsweise eine zeitliche Variation der räumlichen Verteilung der Temperatur durch Wärmeleitung bis sich eine zeitlich konstante Temperaturstabilität einfindet [Hein12, NN2015⁺]. Metalle besitzen aufgrund ihrer höheren Wärmekapazität immer eine viel höhere Wärmeleitung als Kunststoffe. Laut Heinle [Hein12] besitzt expandiertes Graphit eine Temperaturleitfähigkeit von ca. 176 mm²/s. Bei den Messungen von ungeschweißten PPG86- und BMA5-Proben mit Ø 12,7 mm sinken die Messswerte von 12,5 mm²/s bei 50 °C auf 9 mm²/s bei 100 °C (Abbildungen 7.45 und 7.46).

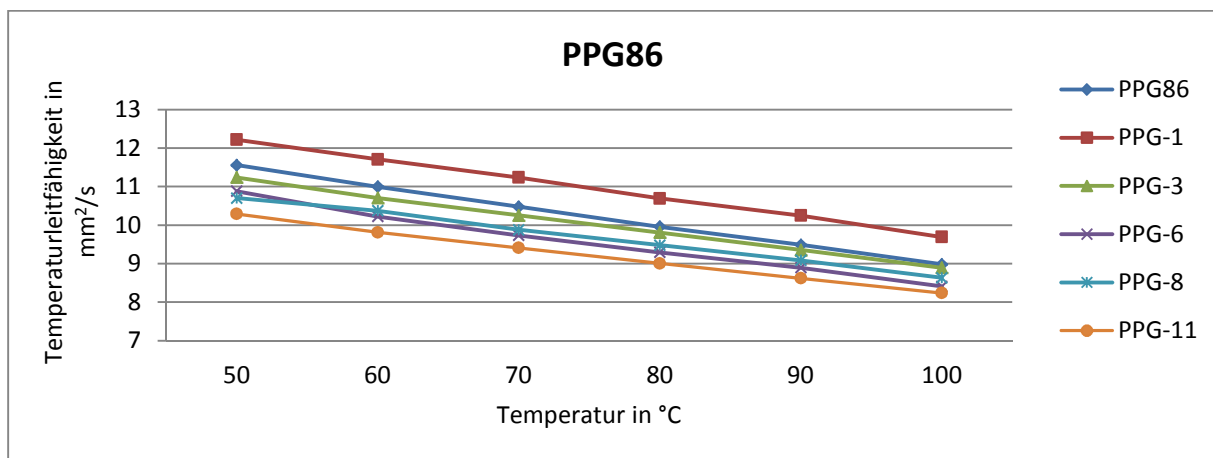


Abbildung 7.45: Ergebnisse der Temperaturleitfähigkeit ausgewählter Proben aus PPG86

Hierdurch lässt sich der Einfluss des Polymer-Binders bei Verschlechterung der thermischen Eigenschaften von Graphit erkennen.

Bei Betrachtung der Gesamtauswertung ist bei beiden Compounds eindeutig, dass die Proben mit geringer Verbindungsfestigkeit (PPG-1 und BMA-5) eine höhere Temperaturleitfähigkeit besitzen als das Grundmaterial. Bei Erhöhung der Schweißparameter ist bei allen Proben eine gegenüber dem Grundmaterial verbesserte Leitfähigkeit ersichtlich. Bei Betrachtung der Ergebnisse der einzelnen Compounds ist bemerkbar, dass eine Steigerung der

Vorwärmungstemperatur eine Senkung der Temperaturleitfähigkeit bewirkt, da alle Proben mit höherer Festigkeit eine Schweißzeit außer PPG-11 von 0,28 s haben. In diesem Fall hat eine kürzere Schweißzeit ebenfalls eine Senkung der gemessenen Werte zur Folge.

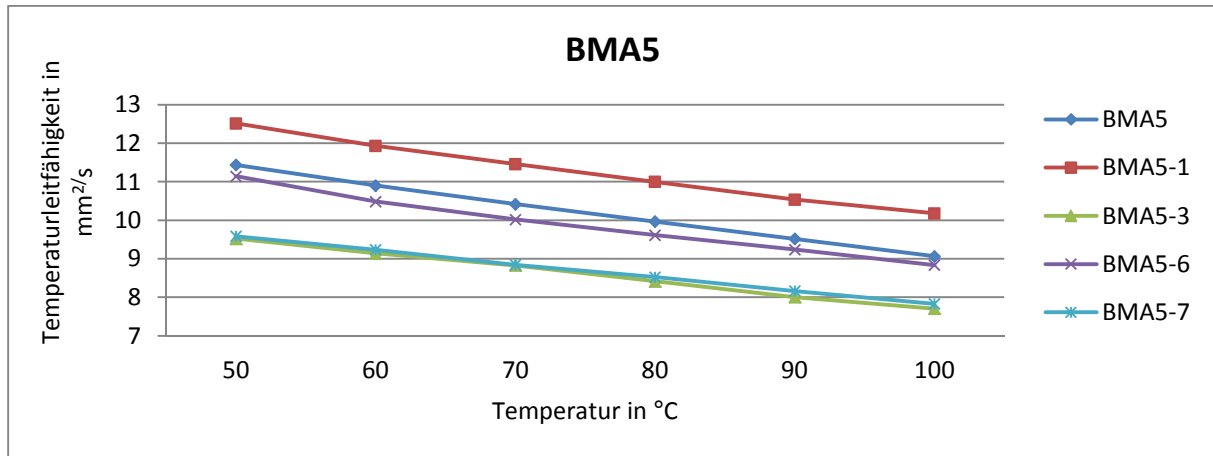


Abbildung 7.46: Ergebnisse der Temperaturleitfähigkeit ausgewählter Proben aus BMA5

Bei Auswertung der untersuchten Proben aus BMA5 ist analog zu PPG86 ersichtlich, dass eine steigende Festigkeit eine Senkung der Temperaturleitfähigkeit hervorruft. Innerhalb der BMA5-Proben hat, im Gegensatz zu PPG86, eine Senkung der Vorwärmungstemperatur und Schweißzeit ebenfalls zur Senkung der Temperaturleitfähigkeit geführt. Da die Bestimmung der thermischen Leitfähigkeit von der Temperaturleitfähigkeit und der spezifischen Wärme abhängig ist, muss dies bei den gleichen Temperaturbereichen noch bestimmt werden. Dies geschah mittels DSC-Verfahren und analog zu vorherigen DSC-Messungen mit der Anlage DSC Q2000 vom Hersteller TA Instruments, USA. Die spezifische Wärmekapazität ist eine materialabhängige Größe und gibt an, welche Temperaturmenge notwendig ist, um die Temperatur bestimmter Stoffe mit einer Masse von 1 Gramm um 1 Kelvin zu erhöhen. Heutzutage gibt es drei Möglichkeiten, um die spezifische Wärmekapazität zu bestimmen. In diesen Untersuchungen wurde lediglich die direkte Methode mit einer Temperaturmodulation ($\pm 0,48$ °C alle 60 s) entsprechend DIN EN ISO 11357-4 eingesetzt. Dabei muss vor der c-Bestimmung eine temperaturabhängige Kalibrierung der Konstanten mit Saphir (Al_2O_3) erfolgen [NN15**]. Die Probengröße wurde entsprechend der Tiegelgeometrie präpariert und besitzt einen Durchmesser von ~ 5 mm bei einer Dicke von 2 mm. Die Verwendung von Saphir als Referenz hat den Vorteil, dass bei der Auswertung und Ermittlung des Korrekturfaktors die c-Literaturwerte von Aluminiumoxid aus der DIN EN ISO 11357-4 entnommen werden können. Gleichzeitig wurde meistens Saphir verwendet, das einen c-Ablauf mit steigender Temperatur ohne Phasenveränderung aufweist. Der Korrekturfaktor

wurde als Quotient aus dem theoretischen und gemessenen Wert der Wärmekapazität bestimmt und dient zum Abgleich von Fehlern, hervorgerufen durch die Messanlage (Spannungsschwankungen, Verschmutzungen etc.). Bei den untersuchten Proben wurde dieser Faktor mit dem gemessenen Wert multipliziert. Alle untersuchten Werkstoffe wurden während des Kalibrierlaufs mit dem gleichen Temperaturprogramm vermessen wie des Saphir. Da wie bereits erwähnt diese Größe materialabhängig ist, wurde dies nicht für alle Proben aus dem Versuchsplan, sondern an den Grundmaterialien PPG86 und BMA5 sowie den ultraschallgeschweißten Proben PPG-9 und BMA-9 durchgeführt.

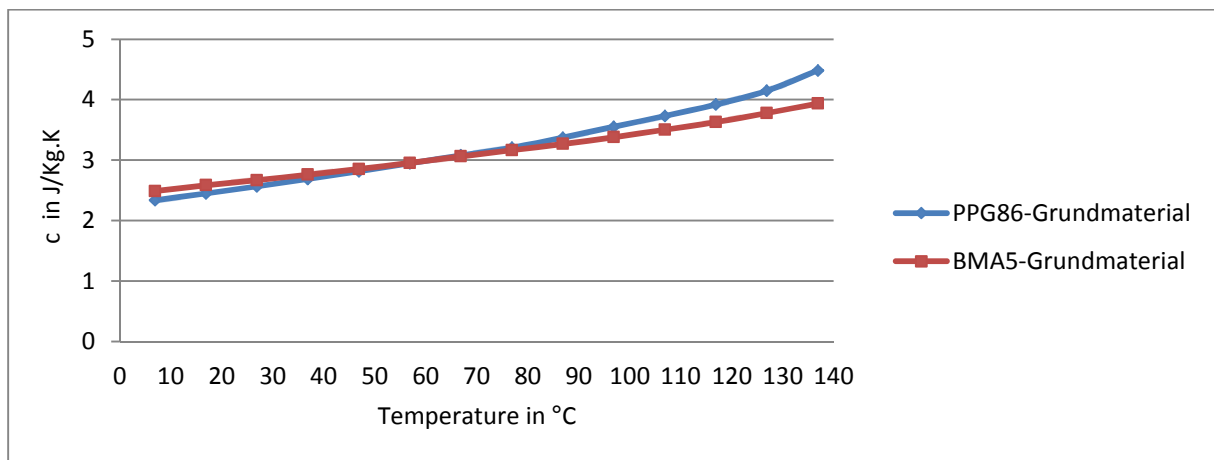


Abbildung 7.47: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität bei den Grundwerkstoffen

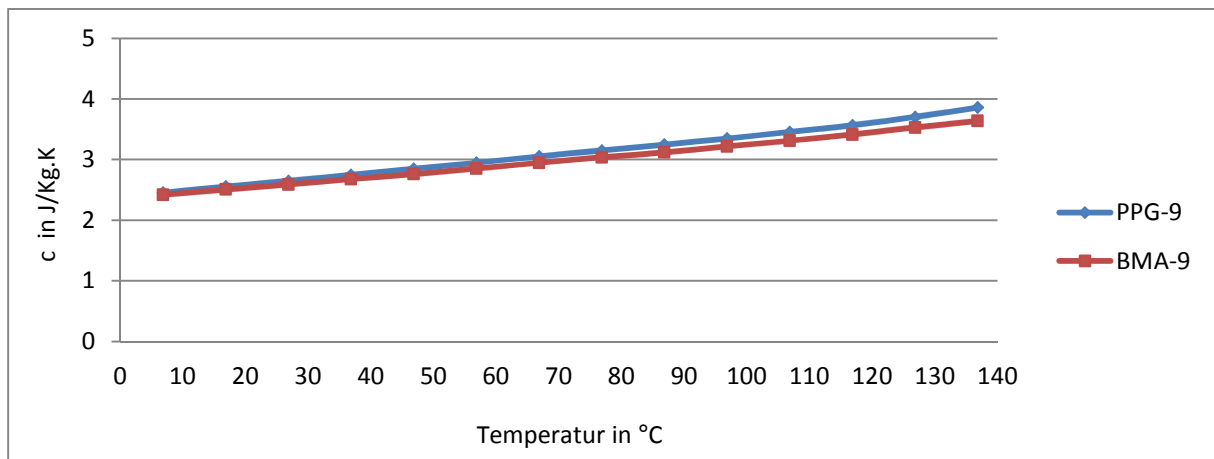


Abbildung 7.48: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität beim hergestellten Verbund

Die Ergebnisse der Messungen am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik sind in den Abbildungen 7.47 und 7.48 dargestellt. Damit die Wärmeleitfähigkeit entsprechend Gleichung 5.2 ermittelt werden kann, muss noch die Dichte der Proben bestimmt werden. Diese wurde mittels Auftriebsmethode nach dem archimedischen Prinzip ermittelt. An dieser Stelle wurden analog zur Messung der spezifischen Wärmekapazität Grundmaterialien und

die Proben PPG-9 und BMA-9 untersucht. In Abbildungen 7.49 - 7.50 sind die errechneten Werte der Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung 5.2 dargestellt. In allen Fällen liegen die Werte oberhalb der vom DoE (U.S. Department of Energy) festgelegten Grenze für Graphit-Compound von 10 W/mK [Stü13]. Solche Platten, die zum Einsatz im Brennstoffzellenbereich dienen, dürfen diese Grenze nicht überschreiten. Bei Betrachtung dieser Werte, bezogen auf die Proben aus dem Versuchsplan, wird festgestellt, dass nur BMA-6 eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit aufweist. Bei den PPG-86-Proben ist eine Verbesserung nur bei den Proben PPG-6, PPG-8 und PPG-1 zu erkennen. Die gesamte durchschnittliche Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit ist bei BMA5 insgesamt 5 % und bei PPG86 ebenfalls 5 %.

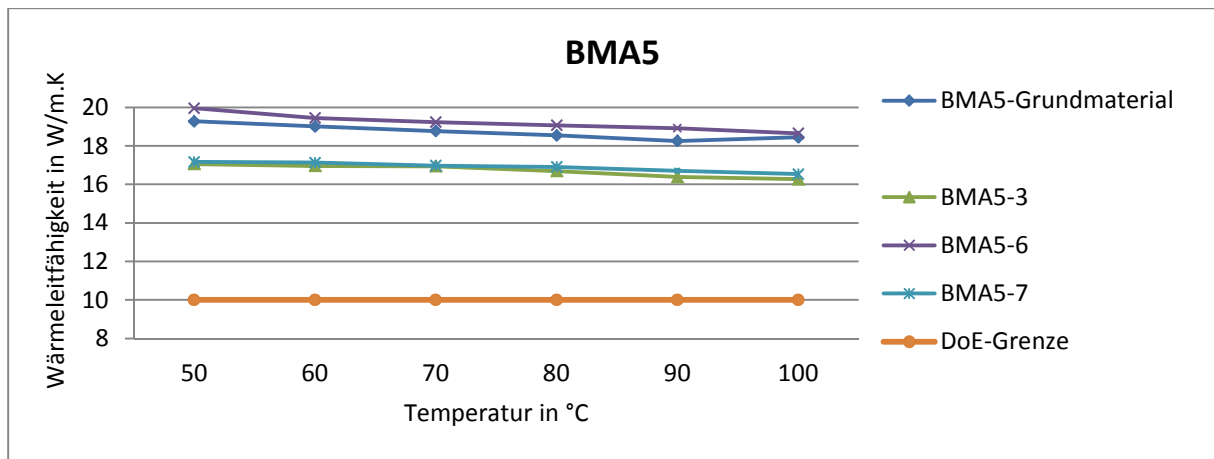


Abbildung 7.49: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit für BMA5 / Metall-Verbund

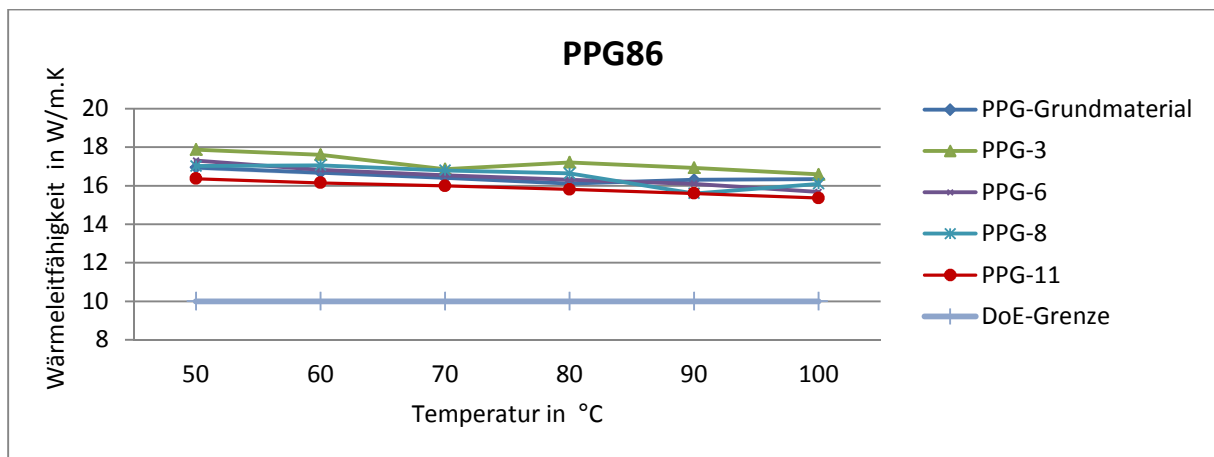


Abbildung 7.50: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit für PPG86 / Metall-Verbund

8. Beurteilung der Ergebnisse

Die bisherigen Erfahrungen mit Ultraschallschweißen neuer Verbunde haben gezeigt, dass eine fundamentale Untersuchung der einzelnen Fügepartner unerlässlich ist. So kann vorbestimmt werden, inwieweit dieses Fügeverfahren für die Erreichung des Ziels geeignet ist. Im Rahmen dieser Arbeit stand die Herstellung eines Verbundes aus hochgefüllten Graphit-Compounds mit Metallen im Vordergrund der Untersuchung. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch extreme geringe Druckfestigkeit aus, sodass zu Beginn der Untersuchungen eine formschlüssige Verbindung mit Metallen nur bedingt möglich war.

Die Vorwärmung hat sich als erfolgreicher Einflussfaktor erwiesen. Die statistische Auswertung der Ergebnisse mit den aufgestellten Versuchsplänen hat einen Beitrag zur optimalen Parameterfindung bezogen auf die Zielgrößen geleistet. Die Optimierung der Einflussfaktoren und Zielgrößen ist in Tabelle 8.1 dargestellt.

PPG86				BMA5		
Einflussfaktor	min.	max.	Optimum	min.	max.	Optimum
Schweißzeit in s	0,2	0,28	0,28	0,3	0,4	0,4
Schweißenergie in J	30	60	60	60	100	100
Vorwärmungstemperatur in °C	40	55	55	40	55	55
Zielgröße	Optimum			Optimum		
Scherzugfestigkeit in N/mm ²	179,12			134,41		
Scherzugdehnung in %	5,91			3,24		
elektrischer Widerstand in Ω	0,42			0,41		

Tabelle 8.1: Optimierte Einflussfaktoren und Zielgröße bei PPG86 und BMA5

Da diese Compounds hauptsächlich als Bipolarplatten im Bereich der Brennstoffzellen und Redox Flow Batterien eingesetzt werden, soll der hergestellte Verbund einen Beitrag für diese Anwendung leisten. Die zusätzlichen Untersuchungen zur formschlüssigen Verbindung der Compound-Platten mit der GDL haben ebenfalls zum Erfolg geführt. Diese über den Stand der Technik hinausgehenden Fortschritten führen zur Reduzierung der ohm'schen Verluste im Stack und damit zur Erhöhung der elektrischen Leistung.

Die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Graphit-Compounds durch den Verbund mit Metall führt ebenfalls zur schnelleren Abfuhr der durch chemischen Reaktionen entstehenden Wassermenge aus dem Stack.

9. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die physikalischen Grundlagen des Ultraschallschweißens dargestellt, beginnend mit dem piezoelektrischen Effekt beziehungsweise der Piezokeramik und deren Funktionprinzip als Kernstück der Ultraschallschweißanlage. Dazu wurden die kinematischen Grundlagen und der Unterschied zwischen Metall- und Kunststoffultraschallschweißen dargestellt. Zuletzt wurde dies bei den Untersuchungen verwendet, weswegen die wichtigsten Baugruppen einer Ultraschallanlage und deren Einfluss auf die Schmelzebildung erläutert wurden. Am Ende dieses Kapitels wurden unter Bezug der chemischen Prozesse die einzelnen Verfahrensschritte des Ultraschallschweißvorganges, ab dem Abschmelzen der ERG, bis zur Abschaltung des Ultraschalls erläutert.

In den folgenden Kapiteln wurde der Stand der bisherigen Anwendungsgebiete des Ultraschallschweißens umfangreich betrachtet. Dabei wurden zahlreiche relevante Literaturquellen zu homogenen Verbunden, bestehend aus Kunststoffen oder Metallen herangezogen. Damit konnte die historische Entwicklung des Verfahrens seit dessen Einführung in der Industrie beleuchtet werden. Da es sich bei den Untersuchungen um eine Hybrid-Verbundherstellung handelt, wurde in diesem Kapitel das bisherige Anwendungsgebiet für nicht homogene Verbunde wie Metall/Keramik oder Metall/Glasfaser in den Fokus gestellt. Das Ultraschallschweißen von Metall mit Kohlefaser sowie von graphithaltigen Thermoplasten brachte zum ersten Mal den Kohlenstoff und das Ultraschallschweißen in Zusammenhang. Zahlreiche Untersuchungen unter Anwendung von statistischen Versuchsplänen haben den Verbund mechanisch und chemisch genauer betrachtet. Da in dieser Arbeit die Vorwärmung ohne jeglichen Bezug auf vorherige Anwendungen als Einflussparameter ins Spiel gebracht wurde, wurde die bisherige Anwendung im Rahmen der IR-Vorwärmung der Proben oder durch Erwärmung des Ambosses und dessen Auswirkung auf die Schweißnahtfestigkeit geschildert. Im dritten Kapitel wurden der Versuchsaufbau, die eingesetzte Ultraschallschweißanlage, die Versuchswerkstoffe sowie deren Eigenschaften definiert. Weitere charakterisierende Untersuchungen wie DSC, elektrische Leitfähigkeit und Rauigkeitsmessung wurden ebenfalls durchgeführt.

Da das hochgefüllte Graphit-Compound das primäre Verbundmaterial ist, wurden seine Herstellungsverfahren Heißpressen sowie Spritzgießen ausführlich beschrieben. Da die Sonotrode das einzige Schweißwerkzeug und deren Auslegung entscheidend für einen erfolgreichen Schweißprozess ist, wurde die Sonotrodengeometrie nach DVS 2216-5 sowie

mit FEM berechnet und mittels eines speziell entwickelten Messsystems eingemessen. Alle diese Methoden konnten sich gegenseitig ergänzen und wiesen eine geringe Differenz auf. Hierdurch wird ein gleichmäßiges Schwingungsverhalten der Schweißwerkzeuge als Bedingung für ausreichenden Schmelzeffluss gewährleistet. Im nächsten Kapitel wurden die festgelegten mechanischen, elektrischen und analytischen Prüfmethoden für das Graphit-Compound/Metall-Verbund definiert. Die wichtigsten Untersuchungen bei diesen neu entwickelten Materialpaarungen sind die Scherzugprüfung sowie die elektrische Widerstandsmessung. Für diese letzte Prüfung wurde eine spezielle Messvorrichtung entwickelt, bei der der elektrische Widerstand in Abhängigkeit des mechanischen Drucks in der Fügezone gemessen wird.

Bei den experimentellen Voruntersuchungen wurde ausführlich bis zum Beginn dieser Arbeit Versuche unternommen, die hochgefüllten Graphit-Compounds mit Ultraschall zu schweißen. Am Anfang der Arbeit lag nur eine Machbarkeitsstudie mit erreichten Fortschritten, die immer weiter ergänzt wurde. Die erste Idee war eine Mehrkomponenten-Platte mit elektrisch leitendem Kern aus Graphit-Compound und elektrisch isolierendem Außenmantel aus Kunststoff. Diese soll eine Anwendung in der PEM-Brennstoffzelle finden. Nach zahlreichen erfolglosen Versuchen kam das Ultraschallschweißen aufgrund seiner Wirtschaftlichkeit und genauen Prozesskontrolle in Betracht, die hochfrequenten Schwingungen führten aber zum Bruch der graphithaltigen Platte. Aus diesem Grund wurde die Vorwärmung der Platten in Betracht gezogen, um den Wärmefluss in der Fügezone zu erhöhen sowie die Sprödigkeit der Compound-Platte zu reduzieren. So konnte eine erste Verbindung zwischen zwei PPG86-Platten sowie eine Mehrkomponenten-Kunststoffplatte hergestellt werden. Diese Verbindungen sind mittels metallografischer Untersuchungen nachgewiesen worden. Dieser Erfolg war ein Anhaltspunkt für die beginnende Umsetzung eines Verbundes aus Graphit-Compound und Nickel. Dieses ist ebenfalls unter Anwendung von Vorwärmung gelungen. Die Auswahl eines Netzgeflechtes als metallischer Fügepartner ist wegen seiner kleinen Drahtdurchmesser zum Eindringen und zur optischen Beurteilung der Schweißnaht vorteilhaft. Ziel dieser grundlegenden Untersuchungen war es, die Effizienz der Brennstoffzellen zu erhöhen. Eine Schweißung des Stromkollektors und der Gasverteiler-Platte wird zur Reduzierung der ohmschen Widerstände, die meistens in diesem Bereich beim Betrieb entstehen, verwendet. Die ersten Untersuchungen zur Leitfähigkeit waren nicht erfolgreich. Dies war dadurch begründet, dass die Messung quer durch die Compoundplatte erfolgte und dass ohmschen Verluste zwischen dem Verbund und dem Messaufbau entstanden. Damit konnte keine genaue Aussage zum Durchgangswiderstand in der Fügezone getroffen werden. Eine zweite

interessante Untersuchung war das Ultraschallschweißen von gleichen Compounds mit einer Gasdiffusionsschicht, ebenfalls zur Anwendung in der Brennstoffzelle. Zahlreiche Schweißungen unter Variation der Sonotrodenspitzen, sowie der Schweißparameter und anschließender Gefügeuntersuchungen, führten zum Erfolg. Zwischen Gasverteilerplatte und GDL-Schicht entstanden parallel ohmsche Verluste, die durch eine hohe Anpresskraft des Stacks ausgeglichen werden mussten. Dies hatte eine Leistungsminderung der Brennstoffzelle zur Folge. Mit den metallografischen Untersuchungen wurde eine kraftschlüssige Verbindung zwischen GDL und Gasverteilerplatte zum ersten Mal in den Fokus gestellt. Dieses kann bei der zukünftigen Schweißprozessoptimierung sowie berührungsfreien Funktionalität der GDL-Schicht zum Durchbruch in der Brennstoffzellentechnik führen, weil damit der Kontaktwiderstand zwischen den beiden Komponenten minimiert. Die Versuche mit einem Edelstahlnetz als metallischer Fügepartner, unter Anwendung der statistischen Versuchsplanung und Auswahl der maximal möglichen einstellbaren Maschinenparameter, führten gleichfalls zur Variation der Zielgrößen. Die Einflussparameter beim Ultraschallschweißen sind zum Teil maschinenabhängig. Da die verwendete Anlage über 25 Jahre alt ist, waren die wichtigsten Faktoren wie zum Beispiel der Anpressdruck zu untersuchen. Andere Schweißparameter wie Haltezeit und Triggerkraft sind in diesem Fall aufgrund der Werkstoffeigenschaften und hoher Wärmeleitung des Metalls nicht relevant und wurden nicht näher betrachtet. Die Probengeometrie sowie die hohe Bruchanfälligkeit des Compounds lassen den Einstellbereich der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur sehr eng dimensionieren. Häufig lag die Grenze zum Bruch oder zur erfolgreichen Bindung bei 0,1 s und 5 °C.

Mit dem ausgewählten faktoriellen Versuchsplan mit vier Zentrumsunkten konnte eine hohe Versuchsauflösung mit vier Fehlerfreiheitsgraden zur schnellen Schätzung der Versuchsfehler aller Haupteffekte und zweifacher Wechselwirkungen geschätzt werden. Damit sind alle definierten Randbedingungen erfüllt worden. Alle Versuche wiesen eine Bindung unterschiedlicher Festigkeit auf und bei keiner der Proben ist ein Riss aufgetreten. Die Auswertung des Versuchsplans, nach Ermittlung der Versuchsgrößen und des erstellten Regressionsmodells, lässt die Gewichtung der Parameter beurteilen. Bei allen Zielgrößen dominieren die Schweißzeit und die Vorwärmungstemperatur als wichtigste Faktoren. Bei allen Proben hat die Zunahme dieser beiden Größen zur besseren Scherzugfestigkeit und zur erhöhten Dehnung geführt. Die Schmelzebildung in der Fügezone ist direkt von den beiden Faktoren abhängig. Dieses hat vorher indirekt durch Messung der Probentemperatur während des Schweißprozesses und durch lichtmikroskopische Ermittlung der Fügewege stattgefunden.

Im Allgemeinen sind die erzielten Festigkeitswerte im Vergleich zu den Ergebnissen mittels Ultraschallfügens hergestellter Verbunde wie Kohlenstoff- und Glasfaserverbundwerkstoffen überlegen. Die elektrische Widerstandsmessung stellte in dieser Arbeit die wichtigste Zielgröße, bezogen auf die Anwendung in der Brennstoffzellentechnik, dar. Danach wurden sie mit aufgelegten Netz und anschließend mit geschweißten Verbund verarbeitet. Die dargelegten Ergebnissen zeigen, dass das Ultraschallschweißen ein geeignetes Verfahren zum Fügen von hochgefüllten Graphit-Compounds mit Metallen darstellt. Die Verbindung zwischen Gasverteilerplatte und GDL-Schicht bei Erhaltung der elektrischen Eigenschaften dieser Schicht könnte zum großen Durchbruch in der Brennstoffzellentechnik führen, weil damit der elektrische Widerstand zwischen den beiden Komponenten praktisch reduziert, was zur Erhöhung der Zellenleistung sowie zur mechanischen Entlastung des Stacks durch Reduzierung der Anpresskräfte führt.

Ebenfalls eignen sich diese Ergebnisse zum Beweis, dass der hergestellte Verbund eine gute Verbindungsfestigkeit besitzt, die der Anwendung in einer Brennstoffzelle gerecht wird. Die Ergebnisse der elektrischen Widerstandsmessung haben ebenfalls gezeigt, dass eine Verbesserung eingetreten ist, die ebenfalls eine Reduzierung der ohmschen Widerstände bewirkt.

10. Ausblick

Die Idee des Ultraschallschweißens von hochgefüllten Graphit-Compounds mit Metallen wurde speziell für die Anwendung im Bereich der Brennstoffzellentechnik initiiert. Die in dieser Arbeit zugrundeliegenden Untersuchungen stellen nur den Anfang eines sehr umfangreichen Forschungsthemas dar. In diesem Zusammenhang besteht noch vertiefender Forschungsbedarf auf zwei Ebenen. Erstens muss das Ultraschallschweißverfahren als Fügeprozess von hochgefüllten Graphitmaterialien hinsichtlich in dieser Arbeit aus technischen Gründen nicht untersuchter Schweißparameter optimiert werden. Zweitens ist es nötig, unter anderem den Einfluss von Anpresskraft, Triggerkraft und Haltezeit bei verschiedenen Materialdicken und Graphitanteilen zu untersuchen. In diesem Zusammenhang muss am Ende ein optimierter Schweißprozess festgelegt werden. Danach müssen für die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der hergestellten Verbunde entsprechend vorgeführte Untersuchungen gemacht werden. Bevor der Bau von Brennstoffzellen begonnen wird, wäre es ebenfalls sinnvoll, die geschweißten Verbunde mit Druck-Temperatur-Belastungstests über lange Zeit zu prüfen. Damit kann bei Auswirkung der metallischen Fügepartner eine bestehende Diffusion in der Fügezone auf die Alterungsrate der Gastverteiler-Platte nachgewiesen werden. Der Ultraschallschweißprozess sollte mit verschiedenen Sonotrodenspitzen erfolgen, um möglichst eine große Fügezone herzustellen. Diese sollte mit Sonotroden mit homogenen Formen ab der unteren Sonotrodenhälfte erfolgen, weil so eine Dämpfung der Sonotrodenschwingungen vermieden werden kann.

Nach Abschluss der zweiten grundlegenden Phase müssen Überlegungen zum optimierten Ultraschallschweißen von GDL-Schicht mit Gasverteilerplatte ohne gefräste Gaskanäle, mit anschließender vergleichender Untersuchung der elektrischen Funktionalität der Schicht vor und nach dem Fügeprozess, gemacht werden. Bei Erfolg müssen diese Untersuchungen um Verbunde mit gefrästen Kanalstrukturen erweitert werden, um wieder den Schweißprozess so zu optimieren, dass die Stege nicht zerstört werden. Die chemischen Eigenschaften der GDL-Schicht müssen an dieser Stelle in den Fokus genommen werden, insbesondere bei möglicher Minderung der elektrischen Leitfähigkeit und vielleicht notwendigem Sprühen der Schicht, nach Abschluss der Schweißprozesses.

Anhand der erzielten Ergebnisse kann entschieden werden, ob vielleicht die Kunststoff-ultraschallschweißverfahren die geeignetste Methode oder das Metallultraschallschweißverfahren mit transversalen Ultraschallwellen oder die Vibrationsschweißverfahren vorteilhaft sind. Viele Untersuchungen im Bereich der Verbundherstellung von Glasfaser- und

Kohlefaserverbundwerkstoffe haben gezeigt, dass die transversale Einbringung des Schalls zur verbesserten Schweißnahtfestigkeit und zur Schonung der Gefüge führen können. Diese Forschungsschritte werden ein paar Jahre dauern, damit nachhaltige Kenntnisse erworben werden können. Nach Abschluss dieser Phase und dem damit verbundenen Erfolg, werden die erreichten Ziele in die Brennstoffzellentechnik übertragen. So kann zum Beispiel ein Stack mit ultraschallgeschweißtem Stromkollektor und GDL gebaut werden und mit anderen Stacks aus dem Stand der Technik verglichen werden. Nach Abschluss dieser Phase werden immer wieder Stacks mit höherer Leistung nach dem gleichen Prinzip gebaut, um immer wieder das Einsatzgebiet der ultraschallgeschweißten Baugruppe zu erweitern. Am Ende ist für weitere Überlegungen zur Optimierung der gesamten Fertigungs- und Montageprozesse der Brennstoffzelle der Erfolg entscheidend.

Literaturverzeichnis

- [Abd14] ABDULLAH, M.; GOHRIAN, A.; RAFIQ, M.; ABDUL KADIR, M.; WAHIT, M.: *Processing of a Multi-Layer Polyetheretherketone Composite for Use in Acetabular Cup Prosthesis*. In: Journal of Applied Polymer Science 131 (20), **2014**
- [Aca14] http://de.academic.ru/pictures/dewiki/80/Perowskit_Piezo.png, Stand **10.12.2014**
- [Ada95] ADAM, T.; MARTINEK, I.; HEROLD, H.: *Einfluß des Ultraschallschweißens auf Struktur und Festigkeitsverhalten von Aluminium Legierungen*. DVS-Berichte 170, S301-305, **1995**
- [Ada95⁺] ADAM, T.; MARTINEK, I.; WODARA, J.: *Qualitätssicherung beim Ultraschall-Schweißen metallischer Werkstoffe*. DVS-Berichte 170, S305-309, **1995**
- [Akb08] AKBARI, M.H.; RISMANCHI, B.: *Numerical Investigation of Flow Field Configuration and Contact Resistance for PEM Fuel Cell Performance*. In: Renewable Energy, 33, 1775-1783, **2008**
- [Age02] AGEORGES, C. and YE, L.: *Fusion Bonding of Polymer Composites*. London: Springer, **2002**
- [Ant11] ANTUNESS, R.A., OLIVEIRA, M.C.L., ETT, G., ETT, V.: *Carbon Materials in Composite Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. A Review of the Main Challenges to improve Electrical Performance*. In: Journal of Power Sources, Vol. 196, No.6, pp. 2945-2961, **2011**
- [Bag07] AL-BAGHDADI, M.; AL-JANABI, H.: *Parametric and Optimization Study of A PEM Fuel Cell Performance using Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Model*. In: Renewable Energy, 32:1077e101, **2007**
- [Bal07] BALLE, F.; WAGNER, G.; EIFLER, D.: *Ultrasonic Spot Welding of Aluminium-Sheet/Carbon Fibre Reinforced Polymer-Joints*. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 38, No. 11, p.934-938, **2007**
- [Bal08] BALLE, F.; EMRICH, S.; WAGNER, G.; EIFLER, D.: *Fügen artfremder Werkstoffe Ultraschallschweißen von Kohlenstofffasertextilien mit Metallen*. MP Materials Testing, 50, Nr.4, S.184-189, **2008**
- [Bal09] BALLE, F.: *Ultraschallschweißen von Metall/C-Faser-Kunststoff (CFK) Verbunden*. Kaiserlautern: Werkstoffkundliche Berichte, Band 22/2009, Dissertation, Hrsg. Prof. Dr. Ing. habil. D. Eifler, Technische Universität Kaiserslautern, **2009**
- [Bal13] BALLE, F.; EMRICH, S.; WAGNER, G.; EIFLER, D.; BRODYANSKI, A.; KOPNARSKI, M.: *Improvement of Ultrasonically Welded Aluminum/Carbon*

- Fiber Reinforced Polymer-Joints by Surface Technology and High Resolution Analysis.* In: Advances Engineering Materials 15, No. 9, **2013**
- [Bas99] BASSANI, I. A.: *Beitrag zur Ultraschallfügetechnologie am Beispiel von Keramik-Metall-Verbindungen.* Stuttgart: Staatliche Materialprüfungsanstalt, Universität Stuttgart, **1999**
- [Bec03] BECKERT, M.: *Aus der Geschichte des Schweißens: Vom Schweißen mit Ultraschall.* In: Schweißen und Schneiden, 55(2003), Heft 5, S. 262-264, **2003**
- [Ben87] BENATAR, A.: *Ultrasonic Welding of Advanced Thermoplastic Composites.* Bosten: Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, **1987**
- [Ben89] BENATAR, A.; CHENG, Z.: *Ultrasonic Welding of Thermoplastics in the Far-Field.* In: Polymer Engineering and science, 29, 1699, **1989**
- [Ben89⁺] BENATAR, A.; GUTOWSKI, T.: *Ultrasonic Welding of PEEK Graphite APC-2 Composites.* In: Polymer Engineering and science, Vol. 29, No. 23, **1989**
- [Böh92] BÖHME, D; HERMANN, FD: *Handbuch der Schweißverfahren Teil II: Autogentechnik, Thermisches Schneiden, Elektronen-Laserstrahl-Schweißen, Reib-, Ultraschall- und Diffusions-schweißen.* Düsseldorf: Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 76/II, DVS-Verlag, **1992**
- [Bor04] BORN, C.: *Ultraschallschweißen zellularer metallischer Werkstoffe mit Blechen.* Kaiserslautern: Werkstoffkundliche Berichte, Band 11, Dissertation Hrsg. Prof. Dr.-Ing. habil. D. Eifler, Technische Universität Kaiserslautern, **2004**
- [Bro10] BROKAMP, S.; KREUZ, C.: *Formteil aus wenigstens zwei Teilelementen und Verfahren sowie Vorrichtung zu seiner Herstellung.* Patent DE 102009018527 A1, **2010**
- [Bru01] BRUNS, J.: *Spannungsanalyse des Ultraschall-Wedge-Wedge-bondens mit Aluminiumdrah unter Berücksichtigung ultraschallabhängiger Werkstoffdaten bei verschiedenen Frequenzen mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente.* Clausthal: Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, TU Clausthal, Dissertation, **2001**
- [Cal13] POP-CALIMANU, M., et al.: *Optimization of Ultrasonic Welding Parameters and Temperature Distribution in Metal Matrix Composite based on Aluminium.* In: Metal 2013, Brno, Czech Republic, **2013**
- [Cha73] CHANG, U.I; FRISCH, J.: *On Optimization of Some Parameters in Ultrasonic Metal Welding Understanding of the Weld Forming Process leads to a Way of Optimizing some Parameters in Ultrasonic Welding.* Paper was presented at The 54th A WS Annual Meeting held in Chicago during April / 2-6, **1973**

- [Cha07] CHANG, W.R.; HWANG, J.J.; WENG, F.B.; CHAN, S.H.: *Effect of Clamping Pressure on the Performance of a PEM Fuel Cell*. In: Journal of Power Sources 166 149–154, **2007**
- [Dav91] DAVIES, P., CANTWELL, W.J., JAR, P.Y., BOURBAN P.E., ZYSMAN, V., KAUSH, H.H.: *Joining and Repair of a Carbon Fibre-Reinforced Thermoplastic*. In: Composites, 22 (6), pp. 425-431, **1991**
- [Dev01] DEVINE, J.: *Ultrasonic Plastics Welding Basics*. In: Welding Journal 80, Nr. 1, S. 29–33, **2001**
- [Die00] DIETZ, P.: *Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen mit besonderen mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen*. Berlin-Heidelberg. Springer Verlag, **2000**
- [Dil05] DILTHEY, U.; BRANDENBURG, A. *Montage hybrider Mikrosysteme, Handhabungs- und Fügetechniken für die Klein- und Mittelserienfertigung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, **2005**
- DIN 1910-3 *Schweißen von Kunststoffen, Verfahren*, **09/1977**
- [Duk11] DUKANE: *Guide to Ultrasonic Plastics Assembly. Intelligent Assembly Solutions*. Dukane Part No. 403-536-02, **2011**
- [Dup14] DuPont: *Verbindungstechniken-Kategorie II Schweißen, Kleben. Kap.10 Ultraschallschweißen*. Datenblatt online abrufbar: plastics.dupont.com/plastics/pdf/europe/design/L12565d_10.pdf, Seite 111-125, Stand **14.06.2014**
- DVS 2216-1 Richtlinie DVS 2216 Teil 1: *Ultraschallschweißen von Kunststoff-Serienteilen-Prozessbeschreibung, Maschinen und Geräte, Einflussgrößen, Konstruktion Qualitätssicherung*, **1992**
- DVS 2216-5 Richtlinie DVS 2216 Teil 1: *Ultraschallschweißen von Formteilen aus thermoplastischen Kunststoffen in der Serienfertigung Sonotroden-Herstellung*, **1992**
- [Ehr97] EHRENSTEIN, G.W.; BITTMANN, E.: *Duroplaste-Aushärtung, Prüfung, Eigenschaften*. München: Carl Hanser Verlag, 2003
- [Ehr03] EHRENSTEIN, G.W.; RIEDEL, G.; TRAWIEL, P.: *Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen*. München: Carl Hanser Verlag, **2003**
- [Ehr04] EHRENSTEIN, G. W.: *Handbuch der Kunststoffverbindungstechnik*. München: Carl Hanser Verlag, **2004**
- [Eic67] EICHHORN, F.; DREWS, P.: *Beitrag zum Ultraschallschweißen von Metallen*. Köln-Opladen: Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. Nr. 1854. Westdeutscher Verlag, **1967**

- [Eif96] EIFLER, D.; SCHLICKER, U., WAGNER, J.; ROEDER, E.: *Ultrasonic Roll Seam Welding for the Production of Glass/Metal Compounds*. In: Glass Science and Technology. Deutsche Glastechnische Gesellschaft 69. Heft10. S.326-330, **1996**
- [Eif09] EIFLER, D.: *Metall-Ultraschallschweißen von flexiblen Flachleiterkabeln*. AIF-Forschungsvorhaben Nr.: 15.112 N, Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Technische Universität Kaiserslautern, **2009**
- [Egg05] EGGERT, F.: *Standardfreie Elektronenstrahl-Mikroanalyse-mit dem EDX im Rasterelektronenmikroskop. Ein Handbuch für die Praxis*. Norderstedt: Books on Demand GmbH, Norderstedt, **2005**
- [Fah13] FAHRENWALDT, H.-J.; SCHULER, V.; TWRDEK J.: *Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, **2013**
- [Ffh01] N.N.: *Fügen von Formteilen und Halbzeugen aus thermoplastischen Kunststoffen mit Ultraschall. Verfahrens-, Konstruktions- und Anwendungs-Empfehlungen*. Karlsbad: Fachverband Elektroschweißgeräte Stresemannallee 19, 6 Frankfurt/M.70. Schulunterlagen der Hermann Ultraschalltechnik GmbH, **2001**
- [Flo11] FLOCK, D.; HABERSTROH, E.; BOBZIN, K.; SCHLÄFER, T.; WARDA, T.; KUTSCHMANN, P.: *Ultrasonic Welding of Hybrid Metal-Plastic Components with Flame Spraying of Adhesion Layer*. In: Journal of Plastics Technology, Seite 160-177, **2011**
- [Fri02] FRITZSCHE, C.: *Untersuchungen zum Hochfrequenzschweißen von Feinblech-Werkstoffen*. Clausthal: Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, TU Clausthal, Dissertation, **2002**
- [Fri14] FRIEDERICH, S.: *Lineares Vibrationsschweißen von Kunststoffen im industriellen Umfeld-Einflüsse und Restriktionen*. Chemnitz: Dissertation. Universitätsverlag, **2014**
- [Fri15] Frick, A.; Stern, C.: *DSC-Prüfung in der Anwendung*. Leseprobe. Hanser Verlag. ISBN 3-446-40563-1.
Online abrufbar:
http://files.hanser.de/hanser/docs/20060505_2012053191937004_978-3-446-40818-0_Leseprobe.pdf.
- [Gar65] GARCIA, R.; HAMMITT, F.G.: *Amplitude Determination of Ultrasonic Transducer by Mean of Accelerometer Assembly*. Michigan: The University of Michigan, Department of Nuclear Engineering, Laboratory of Fluid Flow and Heat Transport Phenomena, **1965**
- [Gode95] GODE, H.-D.: *Ultraschall-Metallschweißen: Funktionsweise und Anwendung einer hochwertigen Verbindungstechnik*. Verlag Moderne Industrie, **1995**

- [Godd72] GODDARD, D.M.; PEPPER, R.T.; UPP, J.W.; KENDALL, E.G.: *Feasibility of Brazing and Welding Aluminium-Graphite-Composites*. In: *Welding Research Supplement*, p. 178-182, **1972**
- [Gre97] GREITMANN, M.J.; ZUCKSCHWERDT, K.: *Ultrasonic Welding of Ceramic/Metal Joints*. In: *DVS-Berichte*, Heft 184, S. 42-45, **1997**
- [Gre07] GREWELL, D.; BENATAR, A.: *Welding of Plastics, Fundamentals und New Developments, Agricultural and Biosystems Engineering*. Iowa State University, **2007**
- [Gre03] GREWELL, D.; BENATAR, A.; PARK, J.: *Plastics and Composites Welding. Handbook*. Munich: Hanser Publishers, **2003**
- [Gre03⁺] GREITMANN, M., ADAM, T.: *Gegenwärtiger Stand und Zukunftsaussichten der Sonderschweißverfahren-Ultraschallschweißen*. In: *Schweißen und Schneiden*, 55(6), S. 306-314, **2003**
- [Gro63] GROSSMANN, H.: *Verschweißungen von Metallteilen mit Hilfe von Ultraschall*. ZIS-Mitteilungen, Halle 5, S377-391, **1963**
- [Gut02] GUTNIK, V.G.; GORBACH, N.V.; DASKOV, A.V.: *Some Characteristics of Ultrasonic Welding of Polymers*. In: *Fibre Chemistry*, 34: 426–432, **2002**
- [Haa89] HAAS, R.: *Finite-Elemente-Methode für die Auslegung von Ultraschall-Sonotroden*. In: *Industrie-Anzeiger* 111, Nr. 87, S. 22-23, **1989**
- [Hab04] HABERSTROH, E.; KUHLMANN, K.: *Prozessführung beim Ultraschallschweißen*. In: *Kunststoffe*. S35-38, **2004**
- [Hah08] HAHN, O.; NEUGEBAUER, R.; KRAUS, C.; LEUSCHEN, G.: *Anwendungsuntersuchung zum Impulsfügen mit Halbhohlstanzniet*. In: *EFB Forschungsbericht*, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung, Band 286. Universität Paderborn, 2008
- [Har96] HARRAS, B.; COLE, K.C.; VU-KHANH, T.: *Optimization of the Ultrasonic Welding of PEEK-Carbon Composites*. In: *Journal of reinforced Plastics and Composites*, Vol. 15, **1996**
- [Har13] HARGOU, K., PINGKARAWAT, K., MOURITZ, A., WANG, C.: *Ultrasonic Activation of Mendable Polymer for Selfhealing Carbonepoxy Laminates*. In: *Composites B*, vol. 45, no. 1, pp. 1031–1039, **2013**
- [Hei12] Heinle, C.: *simulationsgestützte Entwicklung von Bauteilen aus wärmeleitenden Kunststoffen*. Erlangen: Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, **2012**
- [Her90] *Ultraschall in der Kunststoff-Fügetechnik*, Broschüre der Herfurth GmbH, Hamburg, **1990**

- [Her00] HEROLD, H., MARTINEK, I.: *Die Beeinflussung der Ultraschall-Schweißbeignung elektrischer Kupferleiter durch Oberflächenschichten und Lackisolierungen*. Mageburg: Abschlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 11.655B, TU Mageburg, **2000**
- [Her05] HERMANN, A., CHAUDHURI, T., SPAGNOL, P.: *Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A review*, J. Power Sources 30, p.p. 1297-1302, **2005**
- [Hic13] HICKAMANN, T.; KUNDLER, I.; STÜBLER, N.; ZIEGMANN, G.: *Bipolarplatten für Methanol- und Wasserstoff-Brennstoffzellen: Untersuchungen zur Langzeitstabilität*: Duisburg. Workshop Energiewende am ZBT Duisburg, **2013**
- [Hic15] HICKMANN, T.: *persönliche Mitteilung der Eisenhuth GmbH & Co. KG*, **01.04.2015**
- [Hic15⁺] HICKMANN, T.; KUNLER, I.; KUNZ, U.; u.a.: *Entwicklung von leitfähigen Graphit-Polymer-Compounds für elektrochemische Anwendungen in Brennstoffzellen und Redox-Flow-Batterien*. Clausthal: Tagungsband, 1. Niedersächsische Symposium Materialtechnik, Clausthaler Zentrum für Materialtechnik, S. 434-450, **2015**
- [Hue14] HUETTE, I.: *Datenblatt Nickel99.2*. Online abrufbar: http://www.isabellenhuette.de/uploads/media/NICKEL_99.2.pdf, Stand **29.03.2014**
- [Ima06] IMAI, H.; MATSUOKA, S.-I.: *Direct Welding of Metals and Ceramics by Ultrasonic Vibration*, JSME international Journal, Series A, Vol. 49, No. 3, **2006**
- [Ism13] ISMAIL, M.; INGHAM, D.B.; MA, L.; POURKASHANIAN, M.: *The Contact Resistance between Gas Diffusion Layers and Bipolar Plates as they are assembled in Proton Exchange Membrane Fuel Cells*. In: Renewable Energy, vol. 52, pp.40-45, **2013**
- [Jah07] JAHN, R.; COOPER, R.; WILKOSZ, D.: *The Effect of Anvil Geometry und Welding Energy on Microstructures in Ultrasonic Spot Welds of AA6111-T4*. In: Metallurgical and Materials Transactions A. Volume 38A, March 2007, pages 570-583, **2007**
- [Kan12] KANDERHARDT, T.: *Entwicklung einer NT-PEM-FC mit gedrehter Membran-Plattenebene*. Clausthal, Forschungsvorhaben, Förderlinie 2.2.1, **2012**
- [Kan12⁺] KANDELHARDT, T.: *Entwicklung leistungsfähiger Gasverteilerstrukturen für Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle durch numerische Simulation*. Clausthal: Dissertation, Fakultät für Mathematik, Informatik und Maschinenbau, TU Clausthal, **2012**

- [Keb15] Firma KE-beige Technologie. Online abrufbar:
http://german.ke-beige.com/photo/kebeige/editor/20120620094859_31295.jpg,
Stand 10.05.2015
- [Kel94] KELLY, A.: *Concise Encyclopaedia of Composite Materials*. Revised Edition, Elsevier Science, **1994**
- [Kel12] KELLNER, I.N.; ZÄH, M. ; WITT ,G.: *Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken*. Herbert Utz Verlag Wissenschaft, Forschungsbericht IWB Nr. 266, zugl. Dissertation TU München, **2012**
- [Khr00] KHYRYAKOVA, E.S.; VOLKOV, S.S.: *Increasing the parameters of the quality of butt welded joints in polyamides*. In: *Welding International* 14 (9) 749-752, **2000**
- [Kle11] KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung-Produkte und Prozesse optimieren*. München: Hanser Verlag, 7. Auflage, **2011**
- [Kor06] KORIES, J.; SCHMIDT-WALTER, H.: *Taschenbuch der Elektrotechnik*. 7. erweiterte Auflage. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, **2006**
- [Kor86] KORTE, W.: *Einfluss der Spritzgießherstellbedingungen und Möglichkeiten der Prozeßnahen Qualitätssicherung mittels statischer Methoden beim Ultraschallschweißen*. Aachen: Band 58. Dissertation. Hrsg. Prof. Dr.-Ing. W. Michaeli, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, **1996**
- [Kos07] KOSTRZEWA, M.: *Untersuchungen zur Restschmelzeschichtdicke als neues Merkmal zur Prozessoptimierung beim Ultraschallschweißen*. Aachen: AiF-Forschungsvorhaben Nr. 15111N (DVS-Nr. 11.014), Institut für Kunststoff-Verarbeitung- RWTH Aachen, **2007**
- [Kra77] KRAUSE, E.: *Zu den Vorgängen in den Kontaktflächen von kaltpressgeschweißten Werkstoffverbindungen*. Braunschweig: Dissertation. TU Braunschweig, **1977**
- [Kre87] KREITER, J.: *Optimierung der Schweißnahtfestigkeit von Heizelement-Stumpfschweißungen von Formteilen durch verbesserte Prozessführung und Selbsteinstellung*. Paderborn: Dissertation, Universität Paderborn, **1987**
- [Kre88] KRENKEL, W.: *Evaluation of Welded and Adhesive-Bonded Carbon-Fibre-Reinforced Poly(etheretherketone)*. Engineering Applications of New Composites, S.A. Paipetis and G.C. Papanicolaou, eds., Omega Scientific Press, pp. 119-126, **1988**
- [Kre08] KREUZ, C.: *PEM-Brennstoffzellen mit spritzgegossenen Bipolarplatten aus hochgefülltem Graphit-Compound*. Duisburg: Dissertation. Universität Duisburg-Essen, **2008**
- [Krü05] KRÜGER, S.: *Ultraschallschweißen von Glasfasertextilien und Glasfaser-Verbundwerkstoffen mit Blechen*. Werkstoffkundliche Berichte, Band 14,

- Dissertation, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. habil. D. Eifler, Technische Universität Kaiserslautern, **2005**
- [Kuc03] KUCKERT, H.: *Ultraschall-Torsionsschweißen spröd-duktiler Werkstoff-Verbunde*. Kaiserslautern: Werkstoffkundliche Berichte, Band 10, Dissertation, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. habil. D. Eifler, Technische Universität Kaiserslautern, **2003**
- [Kuh06] KUHLMANN, K.: *Untersuchung zum Verhalten von intakten und beschädigten Schwingssystemen beim Ultraschallschweißen*. AACHEN: Hrsg. Prof. Dr.-Ing. W. Michaeli, Dissertaion Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, **2006**
- [Kur04] KURIYKOV, Y.; KÜNKEL, R.; EHRENSTEIN, G.W.: *Vibrationsschweißen mit InfrarotVorwärmung*. In: Der Praktiker 56 , Nr. 12, S. 372-373, **2004**
- [Kut88] KUTTRUFF, H.: *Physik und Technik des Ultraschalls*. Stuttgart: Hirzel Verlag, **1988**
- [Lan93] LANGE, K.: *Umformtechnik-Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 4: Sonderverfahren, Prozesssimulation, Werkzeugtechnik, Produktion*: Berlin-Heidelberg: 2. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, **1993**
- [Leh64] LEHFELDT, W.: *Ultraschallschweißen*. Sonderdruck. Pforzheim: Industrie-Rundschau , Nr. 11, **1964**
- [Leh73] LEHFELDT, W.: *Ultraschall*. Würzburg: Vogel-Verlag, **1973**
- [Lev12] LEVY, A.; LE CORRE, S.; POITOU, A.: *Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites: A Numerical Analysis at the Mesoscopic Scale Relating Processing Parameters, Flow of Polymer and Quality of Adhesion*. Int. Mater Form, **2012**
- [Li04] LI, X.C.; LING, S.F.; SUN, Z.: *Heating Mechanism in Ultrasonic Welding of Thermoplastics*. In: International Journal for the Joining of Materials, 16: 37–42, **2004**
- [Liu02] LIU, S.J.; CHANG, I.T.: *Optimizing the Weld Strength of Ultrasonically Welded Nylon Composites*. In: Journal of Composite Materials, 36, 611, **2002**
- [Lud04] LUDWIG, S.: URL: <https://wiki.blinkenarea.org/bin/view/Blinkenarea/PWM>, Stand **21.06.2004**
- [Mar96] Martinek, I., ADAM, T.: *Die Nutzung der Amboßamplitude zur Qualitätssicherung beim Ultraschallschweißen metallischer Werkstoffe*. In: Schweißen und Schneiden, 48(1996), S.226-227, **1996**
- [Mas14] MASAKI, T.; TAKUMI, K.: *Method for Manufacturing Joint Member*. Patent US 20140286697 A1, **2014**

- [Mat06] MATTHES, K. J.; RICHTER, E.: *Schweißtechnik*. 3.Auflage. Münschen-Wien: Carl Hanser Verlag, **2006**
- [Meh04] MEHLER, C.; WEBER, M.; SENGE, M.; KESSLER, T.; HENNING, I.: *Bipolarplatte für PEM-Brennstoffzellen*. Patent EP1401039 A2, **2004**
- [Men96] MENGES, G. and POTENTE, H.: *Study on the Weldability of Thermoplastic Materials by Ultrasound*. In: *Welding in the World*, 9(1/2): 46–59, **1996**
- [Men71] MENGES, G.; POTENTE, H.: *Studies on the Weldability of Thermoplastic Material by Ultrasound*. *Proc. of Welding in the World*, 9, **1971**
- [Men11] MENGES, G., HABERSTROH, E., MICHAELI, W., SCHMACHTENBERG, E. *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe*. München. 6. Auflage. Carl Hanser Verlag, **2011**
- [Mic93] MICHAELI, W.; KORTE, W.: *Bessere Nahtqualität beim Ultraschall-Schweißen Kraftregelung mit Servoventil eröffnet neue Wege der Prozessführung*. In *Kunststoff*, Heft9, S667-670, **1993**
- [Mic92] MICHAELI, W. ; NETZE, C. ; KORTE, W.: *Prozessanalyse beim Ultraschall-Schweißen am Beispiel hochtemperaturbeständiger Thermoplaste-Strategien zur Erzielung hoher Schweißnahtqualitäten*. In: *DVS-Berichte*. Band 147 *Kunststoffschweißen und -Kleben*, S. 56–59, **1992**
- [Mic92⁺] MICHAELI, W.; NETZE, C.; KORTE, W.: *Prozessanalyse beim Ultraschall-Schweißen am Beispiel hochtemperaturbeständiger Thermoplaste-Strategien zur Erzielung hoher Schweißnahtqualitäten*. In: *DVS-Berichte*, Heft 147, S. 5-9 , **1992**
- [Mic96] MICHAELI, W., KORTE, W.: *Neue Konzepte beim Ultraschallschweißen verbessern die Nahtqualität*. In: *Schweißen und Schneiden*, 48(1996), S.270-277, **1996**
- [Mic09] MICHAELI ,W.: *Untersuchungen zur Restschmelzeschichtdicke als neues Merkmal zur Prozessoptimierung beim Ultraschallschweißen*. Aachen: Abschlussbericht zum IGF- Forschungsvorhaben Nr.15111N, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, **2009**
- [Mic10] MICHAELI, W.; WEBER, M.: *Ultraschallschweißen hybrider Systeme in der Mikrotechnik*. Aachen: Kolloquium des IKV, **2010**
- [Mic11] MICHAELI, W.; HOPMANN, Ch.; VAN AAKEN, A.; WEBER, M.. *Untersuchungen zur Erweiterung der Anwendungsgebiete des Ultraschallschweißens durch Einsatz einer Vorwärmung*: Hamburg: DVS-Berichte "Große schweißtechnische Tagung 2011", 26.-29, S. 478-483, **2011**
- [Mil87] MILLNER, R.: *Ultraschalltechnik.Grundlagen und Anwendungen*. Weinheim: Physik-Verlag, **1987**

- [Moh15] MOHR, R.: Persönliche Mitteilung der Hermann Ultraschalltechnik, **07.05.2015**
- [Mül03] MÜLLER, A.: *Erdgasbetriebene PEMFC-Hausenergieversorgungsanlage*. Mettingen: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Projekt-Kennung 0327089B, SGL Technologies GmbH, Meitingen, **2003**
- [Mül06] MÜLLER, A; KAURANEN, P.; VON GANSKI, A.; HELL, B.: *Injection Moulding of Graphite Composite Bipolar Plates*. In: Journal of Power Sources 154, p.p. 467-471, **2006**
- [Neh12] NEHER, J.: *Neuro-Fuzzy-Modellierung zur umfassenden Prozess-Überwachung am Beispiel des Ultraschallschweißens von Kunststoffteilen*. Dissertation, Fraunhofer Verlag, **2012**
- [Nei15] NEIDHARDT, F.: *Laser Flash Apparatus LFA 457 MicroFlash® Method, Technique, Applications of Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity*. Persönliche Mitteilung der Firma Netzsch Gerätebau GmbH, Selb, **2015**
- [Nei15⁺] NEIDHARDT, F.: *Laser Flash Analysis-LFA Method, Technique. Applications*. Persönliche Mitteilung der Firma Netzsch Gerätebau GmbH, **2015**
- [Nes03] NESTERENKO, N.P.; SENCHENKOV, I.K.: *Current State and Prospects of Ultrasound Welding of Polymer and Thermoplastic Composite Materials*. In: Welding International, Volume 17, Issue 3, pages 232-238, **2003**
- [Net92] NETZE, C.-R.: *Ultraschallschweißen von hochtemperaturbeständigen, unverstärkten, Kurzglasfaser- und endlosfaserverstärkten Thermoplasten*. AACHen: Band 13. Dissertaion. Hrsg. Prof. Dr.-Ing. W. Michaeli, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), RWTH Aachen, **1992**
- [Nie05] NIEMZIG, O.C.: *Entwicklung eines portablen PEM-Brennstoffzellensystems mit Bipolarplatten aus einem elektronisch leitfähigen thermoplastischen Compound-Material*. Duisburg: Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der Universität Duisburg-Essen, Dissertation, **2005**
- [NN92] N.N.: *Maschineneinstellparameter beim Ultraschallschweißen*. Leverkusen: ATI869, Bayer AG, **1992**
- [NN93] N.N.: *Technische Dokumentation*. Hamburg: Herfurth GmbH. Auftrag-Ordner 29249, **1993**
- [NN93⁺] N.N.: *Technische Dokumentation*. Hamburg: Herfurth GmbH, **1993**
- [NN98] N.N.: *Produktinformation zum digitales Generator*. Dietzenbach: Branson Ultraschall, **1999**
- [NN99] N.N.: *Ultraschall für das Kunststofffügen*, Dietzenbach: Branson GmbH, **1999**

- [NN04] N.N.: *Kunststoffpraxis: Konstruktion. WEKA Praxis Handbuch Plus.* WEKA Media GmbH & Co. KG, **2004**
- [NN11] N.N.: *Charakterisierung hochgefüllter Graphit-Compounds zur Auslegung und Optimierung des Spritzgießprozesses für Bipolarplatten in Brennstoffzellen-Anwendungen.* Duisburg: Abschlussbericht für IGF Forschungsvorhaben Nr. 304 ZN, Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT), Duisburg, **2011**
- [NN12] N.N.: *Graphene in Brennstoffzellen und Lithium-Ionen-Batterien.* Duisburg: Forschungsvorhaben 03X0112, ZBT GmbH, **2012**
- [NN13] N.N.: *Ultraschall Schweißtechnologie, Broschüre „Dialog“.* Karlsbad: Hermann Ultraschalltechnik GmbH, **2013**
- [NN14] N.N.: *Ultraschallschweißen.* Online abrufbar unter: <http://www.sonotronic.de/technologien/ultraschall/ultraschallschweisse> Stand **2014**
- [NN14⁺] N.N.: *Schulungsunterlagen, Ultraschallschweißtechnik für thermoplastische-Kunststoffe.* Persönliche Mitteilung der Hermann Ultraschalltechnik GmbH, **2014**
- [NN14*] N.N.: *Untersuchung der Reaktionskinetik von Photopolymeren im Dentalbereich.* Online abrufbar : http://fb05.fh-bonn-rheinsieg.de/annamedia/Bilder/projekte/Dentalmassen/Funktionsprinzip_DSC_DMA_DEA.pdf, **2014**
- [NN15] N.N.: Mitteilung der Eltec Technolog: *Ultraschallschweißen von thermoplastischen Kunststoffen und Litzen:* Online abrufbar: <http://www.eltectechology.com/de/verfahren/ultraschallschweissen.html>, Stand **07.03.2015**
- [NN15⁺] N.N.: *Datenblätter der Eisenhuth GmbH & Co. KG:* Online abrufbar: <http://www.eisenhuth.de/pages/frameset.html>, Stand **01.04.2015**
- [NN15⁺⁺] N.N.: *persönliche Mitteilung-Datenblatt der Ensinger GmbH,* **2015**
- [NN15⁺⁺⁺] N.N.: *Kurzinformation zu D-optimalen Versuchsplänen, Statgraphics UMEX-Information.* Dresden: UMEX GmbH.
Online abrufbar unter: www.umex.de, Stand **11.04.2015**
- [NN2015] N.N.: *Deutsche Edelstahlwerke, 1.4031 Nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Stahl.* Online abrufbar: <http://www.dew-stahl.com/publikationen/werkstoffdatenblaetter/rsh-staehle/> Stand **27.04.2015**
- [NN2015⁺] N.N.: *Temperaturleitfähigkeit und Wärmeeindringung.* Online abrufbar: http://www.hanffaser.de/Txt_Analysen_Erklarungen/Bau_Temperaturleitfahigkeit.htm, Stand **04.06.2015**
- [NN15*] N.N.: *Praxishandbuch STATGRAPHICS,* UMEX GmbH Dresden, **2015**

- [NN15**] N.N.: Technische Dokumentation der Firma TA Instruments, persönliche Mitteilung der Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik, 2015
- [Non96] NONHOF, C.J.; LUITEN, G.A: *Estimates for Process Conditions during the Ultrasonic Welding of Thermoplastics*. In: Polymer Engineering and Science 36, Nr. 9, S. 1177–1183, **1996**
- [Osl15] UNIVERSITÄT OSLO: The Faculty of Mathematics and Natural science. Department of Physics Online abrufbar:
<http://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/projects/bate/thermoelectricity/infrastructure/index.html>. Stand **05.05.2015**
- [Ort15] ORTH, A.; WENZEL, D.: *Modellgestützte Versuchsplanung und Optimierung in ihrer Anwendung. DOE-Leitfaden*.
Online abrufbar: www.versuchsplanung.de, Stand **11.04.2015**
- [Özt12] ÖZTÜRK, G.: *Hochgefüllte Graphit-Polymer-Compounds für Einsätze in Wärmemanagement*. Darmstadt: Fachbereich Chemie der Technischen Universität Darmstadt, Dissertation, **2012**
- [Pot71⁺] POTENTE, H.: *Zur Frage der Energieumwandlung beim Ultraschall-Schweißen von Thermoplasten*. In: Plastverarbeiter, 22. Jg., S. 653 – 658, **1971**
- [Pot87] POTENTE, H.; MICHEL, P.; RUTHMANN, B.: *Eine Analyse des Vibrations-Schweißens*. In: Kunststoffe 77 , Nr. 7, S. 711–716, **1987**
- [Pot04] POTENTE , H.: *Fügen von Kunststoffen. Grundlagen, Verfahren, Anwendung*. Hanser-Verlag, **2004**
- [Pot04⁺] POTENTE, H.; KARGER, O.; MÜLLER, A.: *In Kombination- Durch IR-Vorwärmung kein Abrieb beim Vibrationsschweißen*. In: Plastverarbeiter 55, Nr. 3, **2004**
- [Reu92] REUTER, M: *Das Ultraschallschweißen von Glas und Glaskeramik mit Metall am Beispiel des Aluminiums*. Kaiserslautern: Dissertation, Universität Kaiserslautern, **1992**
- [Rit14] FEINTECHNIK RITTMAYER: *Lausige Wellen.Wie Sie Fehler im Ultraschallschweißprozess aufspüren, Ein Ratgeber für Praktiker*, Münster, **2014**
- [Rit86] RITTER, J.: *Untersuchungen zur Energieumwandlung und zum Schwingungsverhalten des Systems Sonotrode, Fügeteile und Amboss beim Ultraschallschweißen ausgesuchter Thermoplaste*. München: Dissertation, TU München, **1986**
- [Rom11] BARROSO ROMERO, M.; VILLEGAS, I.; BERSEE, H.E.N.: *Optimizing Ultrasonic Welding of Carbon Fiber Reinforced Polyetherimide (CF/PEI)*. SETEC 11 Leiden - 06TH. International Technical Conference “Advanced Composites, The integrated Systems”, **2011**

- [Rot04] ROTHEISER, J.: *Joining of Plastics*. München: 2nd Edition. Carl Hanser Verlag, **2004**
- [Sac15] SACKMANN, J., BURLAGE, K., GERHARDY, C., MEMERING, B., LIAO, S., SCHOMBURG, W.K.: *Review on Ultrasonic Fabrication of Polymer Micro Devices*. In: *Ultrasonics* 56, 189–200, **2015**
- [San04] SANCAKTAR, E.; WALKER, E.: *Effects of Calcium Carbonate, Talc, Mica, and Glass-Fiber Fillers on the Ultrasonic Weld Strength of Polypropylene*. In: *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 94, 1986–1998, **2004**
- [Sch82] SCHWARTZ, S.; SODERSTROM, R.; BJAREKLINT, A.: *Method of Joining Metal to Graphite by Spot Welding*, Patente No. US4343982 A. Online abrufbar: <http://www.google.com/patents/US4343982#legal-events>, **1982**
- [Sch97] SCHLICKER, U.; ROEDER, E.; EIFLER, D.: *Joining of Glasses with Metals by Ultrasonic Roll Seam Welding*. In: *DVS-Berichte*, Heft 184, S. 39-42, **1997**
- [Sch98] SCHLICKER, U.: *Ultraschall-Rollnahtschweißen von Glas/Metall-Verbunden unter besonderer Berücksichtigung thermischer Eigenspannungen*. Kaiserslautern: Werkstoffkundliche Berichte, Band 5, Dissertation, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. habil. D. Eifler, Technische Universität Kaiserslautern, **1998**
- [Sch98⁺] SCHOER, H.: *Schweißen und Hartlöten von Aluminiumwerkstoffen*. Düsseldorf: Fachbuchreihe Schweißtechnik, DVS-Verlag, **1998**
- [Sch15] SCHAUERMAN, C.; ALVARENGA, J.; STAUB, J.; FORNEY, M.; FORINGER, R.; LANDI, B.: *Ultrasonic Welding of Bulk Carbon Nanotube Conductors*. In: *Advanced Engineering Materials*, Vol. 17, No. 1, **2015**
- [Shi15] SHIN, H.; DE LEON, M.: *Parametric Study in similar ultrasonic spot welding of A5052-H32 alloy sheets*. In: *Journal of Materials Processing Technology* 224 (2015), page 22-232, **2015**
- [Soo11] SOORIYAMOORTHY, E.; PONNAYYA, S.; HENRY, J.; KALAKKATH, P.: *Experimental Studies on Optimization of Process Parameters and Finite Element Analysis of Temperature and Stress Distribution on Joining of Al–Al and Al–Al₂O₃ Using Ultrasonic Welding*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 55 (5-8), 631-640, **2011**
- [Str95] STROFUSS, W.: “Schwarze Magie“? In: *Kunststoffe* 85, Nr. 6, S.827–833, **1995**
- [Ste68] STEMMER, R.: *Untersuchungen zum Verschweißen von Kupfer und Aluminium mit Glas mit dem Ultraschallschweißverfahren*. In: *Metall* 22, S.1103-1108, **1968**
- [Stü12] STÜBLER, N.; HICKMANN, T.; ZIEGMANN, G.: *Electrical and Mechanical Properties of Graphite-Based Polymer Composites for bipolar Plates in PEM Cells*. Venice: 15TH European Conference in Composite Materials, **2012**

- [Stü14] STÜBLER, N.; HICKMANN, T.; ZIEGMANN, G.: Investigation of the Properties of Polymer Composite Bipolar Plates in Fuel Cells. In: Journal of Plastic Technology 10 (3), p.p. 68-89, **2014**
- [Stu15] STURMBICLER, M.: *persönliche Mitteilung der Einsinger GmbH*, **01.04.2015**
- [Sto89] STOKES, V.: *Joining Methodes for Plastics and Plastic Composite*. In: Polymer Engineering & Science, Volume 29, Issue 19, pages 1310–1324, **1989**
- [Stat15] STATGRAPHICS Centurion XVII, Version 17.106, Hilfedatei, **2015**
- [Sya14] SYASSEN, F.; BORN, J.; BALLE, F.: *Joining of Titanium and Titanium Alloys to Carbon Fibres and Carbon-Fibre Reinforced Polymer Components by Ultrasonic Welding*: Patent EP 2754546 A1, **2014**
- [Tie97] TIETZE, S.: *Entwurf des Ambosses einer Ultraschallschweißeinrichtung für Packstoffe*. Dresden: Shaker Verlag, Dissertation, Technische Universität-Dresden, **1995**
- [Tol83] TOLUNAY, M.N.; DAWSON, P.R.; WANG, K.K.: *Heating and Bonding Mechanisms in Ultrasonic Welding of Thermoplastics*. In: Polymer Engineering and Science 23, Nr. 13, S. 726–733, **1983**
- [Tou08] TOUGHTON, M.: *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide*. 2nd Edition, **2008**
- [Tur02] TURPIN, M.C.; BOFF, J.C.; BILTON, B.M.: *Patent WO2002091506 A1*, **2002**
- [Tur04] TURPIN, M.C.; BOFF, J.C.; BILTON, B.M.: *Patent US20040151972 A1*, **2004**
- [Twi15]: TWI (N.N): *Ultrasonic welding of injection moulded components*. Online abrufbar: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/ultrasonic-welding-of-injection-moulded-components-part-1-process-and-equipment-061/>. **Stand 01.05.2015**
- [Ueb95] UEBBING, M.: *Berechnungsmöglichkeiten und Qualitätssicherung beim Vibrationsschweißen*. Düsseldorf: Deutsche Verlag für Schweißtechnik, Dissertation, Universität-Gesamthochschule Paderborn, **1995**
- [Vil10] VILLEGAS, I. F.; BERSEE, H.: *Ultrasonic Welding of Advanced Thermoplastic Composites: An Investigation on Energy-Directing Surfaces*. In: Advances in Polymer Technology Vol. 29(2), 112-121, **2010**
- [Vil12] VILLEGAS, I. F.; MOSER, L.; YOUSEPOUR, A.; MITSCHANG, P.; BERSEE, H. E. N.: *Process and Performance Evaluation of Ultrasonic, Induction and Resistance Welding of Advanced Thermoplastic Composites*. In: Journal of Thermoplastic Composite Materials, 00(0) 1-18, **2012**

- [Vil13] VILLEGAS, I. F.: *In Situ Monitoring of Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composites through Power and Displacement Data*. In: Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 1-20, **2013**
- [Vri04] VRIES, E: *Mechanics and Mechanism of Ultrasonic Metal Welding*, Ohio: Ph.D. thesis, Ohio state University Columbus, page 40-85, **2004**
- [Wod86] WODARA, J.: *Ultraschalleignung metallischer Werkstoffe*, ZIS Mitteilungen 28,2, 230-236, **1986**
- [Wag97] WAGNER, G.: *Ultraschallschweißen von Glas und Glaskeramik mit Metallen sowie Erzeugung von Glas, Glas-Verbunden*. Werkstoffkundliche Berichte, Band 2, Dissertaion, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. habil. D. Eifler, Technische Universität Kaiserslautern, **1997**
- [Wag97⁺] WAGNER, J.: *Ermittlung mechanischer Festigkeitseigenschaften und thermischer Eigenspannungen an ultraschallgeschweißten Keramik/Metall-Verbunden*. Kaiserslautern: Werkstoffkundliche Berichte, Band 2. Dissertation. Hrsg. Prof. Dr.-Ing. habil. D. Eifler, Technische Universität Kaiserslautern, **1997**
- [Wag97⁺⁺] WAGNER, T.: *Ultraschallschweißen. Trends und Tendenzen beim Verbinden von Kunststoffteilen mit Ultraschall*. Essen: Veranstaltungs-Unterlagen. 17.-18. November 1997, Haus der Technik, **1997**
- [Wag09] WAGNER, G.; EIFLER, D.: *Metall-Ultraschallschweißen von flexiblen Flachleiterkabeln*. Kaiserslautern: AIF-Forschungsvorhaben Nr. 15.112N, Abschlussbericht, Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Technische Universität Kaiserslautern, **2009**
- [Wod80] WODARA, J.; ECKHARDT, S.: *Einfluss von Sonotroden und Amboss auf die Güte von Ultraschallschweißverbindungen*. ZIS Mitteilungen 22, Nr. 2, S.157-165, **1980**
- [Wod04] WODARA, J.: *Ultraschallfügen un -trennen*. Mageburg: Fachbuchreihe Schweiß Technik, Band 1 der „Grundlagen der Fügetechnik“ Hrsg. Prof.Dr.-Ing. habil. Dr. E.h.H. Herold. DVS Verlag, **2004**
- [Wei09] WEISSDORN, A.: *Entwicklung und Bau eines Direkt-Methanol-Brennstoffzellensystems als Ladegerät für einen akkubetriebenen Geh-Gabelhubwagen*. Clausthal: Fakultät für Energie-und Wirtschafts-Wissenschaften, TU Clausthal, Dissertation, **2009**
- [Wes15] WESLING,V.; HICKMANN, T.; GIESE, P.; GRIMM, H.; AL MASRI, A.: *Herstellung von Ni-Funktionsfläche auf Graphit-Compound-Platten mittels Ultraschallschweißen*. Clausthal: Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau, TU Clausthal, **2015**
- [Wes15⁺] WESLING,V.; HICKMANN, T.; GIESE, P.; HAMJE, J.; AL MASRI, A.: *Untersuchungen zum Ultraschallschweißen von Gasdiffusionsschichten mit*

- graphithaltigem Gasverteiler in Brennstoffzellen*. Clausthal: Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau, TU Clausthal, **2015**
- [Yee10] YEETSORN, R.: *Development of Electrically Conductive Thermoplastic Composites for Bipolar Plate Application in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell*. Waterloo: Department of Chemical Engineering, University of Waterloo, **2010**
- [You04] YOUSEPOUR, A.; HOJJATI, M.; IMMARIGEON, J.: *Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites*. In: Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol.17, pp.303-314 **2004**
- [Zap15] Firma Zapp: *Specialty Materials TiAl6V4, zertifiziert nach ISO 9001*. Online abrufbar:https://www.zapp.com/fileadmin/download/03-orange/01-nickel-kobalt-titan/01-datenblaetter/16-Titan%20TiAl6V4_Grade%205_d_09.13.pdf, Stand **15.04.2014**
- [Zie00] ZIEGELTRUM, M.: *Untersuchung von Ultraschallverbindungen in der Kombination unterschiedlicher Thermoplaste mit einer und mehreren Fügeebene*. Paderborn: Dissertation, Universität Paderborn, Herbert Utz Verlag, **2000**
- [Zon09] ZONGBO, Z.; XIAODONG, W.; YI, L.; ZHENQIANG, Z., LIDING, W.: *Study on Heating Process of Ultrasonic Welding for Thermoplastics*. In: Journal of Thermoplastic Composite Materials, **2009**
- [Zuc99] ZUCKSCHWERDT, K., M. J. GREITMANN, Roos, E.; KUSSMAUL, K. : *Ultraschallschweißen von unterschiedlich beschichteten Oxidkeramiken mit Anschlußteilen aus Kupfer*. In. Schweißen und Schneiden, 51 , Heft 10, S. 636-640, **1999**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Schematische Darstellung des Untersuchungsziels	3
Abbildung 2.2:	Sytematische Vorgehensweise zur Betrachtung der Problemstellung	5
Abbildung 3.1:	Piezoelektrische Elementarzellen von PZT-Keramik mit kubischer und tetragonaler Kristallstruktur	7
Abbildung 3.2:	Verfahrensprinzip beim Ultraschallkunststoff-und Metallschweißen	11
Abbildung 3.3:	Funktionsweise des Ultraschallschweißverfahrens.....	12
Abbildung 3.4:	Ersatzschaltbild des Stromkreisen bei einer Ultraschallschweißmaschine	13
Abbildung 3.5:	Stehende Welle bei schallhartem beziehungsweise schallweichem Abschluss	18
Abbildung 3.6:	Aufgetretene Schwingungen in der Fügezone	21
Abbildung 3.7:	Wärmebildung in der Fügezone beim Ultraschallschweißen	22
Abbildung 3.8:	Prozessablauf beim Ultraschall-Kunststoffschweißen nach	24
Abbildung 3.9:	Fließen in der Fügeebene beim Ultraschallschweißen.....	28
Abbildung 3.10:	Ultraschallschweißbarkeit-Kompatibilitätstabelle für Thermoplaste.....	38
Abbildung 4.1:	Ultraschallschweißanlage USV 2500 C von Herfurth mit Proben- Fixiervorrichtung	42
Abbildung 4.2:	Schweißaufbau (schematisch).....	43
Abbildung 4.3:	Schweißaufbau (real)	44
Abbildung 4.4:	Produktionsprozessablauf beim Spritzgießen von Graphit- Compounds mit thermoplastischen und duroplastischen Bindern.....	46
Abbildung 4.5:	DSC-Analyse der PPG86	49
Abbildung 4.6:	DSC-Analyse der BMA5	50
Abbildung 4.7:	DMA-Analyse der PPG86-Platte	51
Abbildung 4.8:	DMA-Analyse der BMA5-Platte	51
Abbildung 4.9:	a) 3D Rauheitsprofil an PPG86-Platte b) REM-Aufnahme der Oberfläche an PPG86-Platte	52
Abbildung 4.10:	a) 3D Rauheitsprofil an BMA5-Platte b) REM-Aufnahme der Oberfläche an BMA5-Platte	52
Abbildung 4.11:	a) 3D Rauheitsprofil an TECACOMP-Platte b) REM-Aufnahme an TECACOMP- Platte	53
Abbildung 4.12:	Elektrische Leitfähigkeitsmessung der untersuchten Graphit- Compounds	54
Abbildung 4.13:	Spektrum-EDX-Analyse des Ni-Netzes	56
Abbildung 4.14:	Spektrum-EDX-Analyse des 1.4301-Netzes	56
Abbildung 4.15:	Probengeometrie schematisch (links) und real (-rechts).....	57

Abbildung 4.16:	stufenförmige Sonotrode.....	59
Abbildung 4.17:	Ermittlung der Eigenfrequenz der Baugruppe Booster-Sonotrode A mit FEM	61
Abbildung 4.18:	Ermittlung der Eigenfrequenz der Baugruppe Booster-Sonotrode B mit FEM	61
Abbildung 4.19:	Versuchsaufbau des Sonotroden-Einmessungssystems	62
Abbildung 4.20:	Ergebnisse der Einmessung von Sonotrode A	63
Abbildung 4.21:	Ergebnisse der Einmessung von Sonotrode B	63
Abbildung 4.22:	Amplitudenspektrum über der Zeit mittels YOGAWA Scope Corder DL750	64
Abbildung 4.23:	Schematische Darstellung eines Versuchsplans	65
Abbildung 4.24:	Graphische Darstellung eines 2 ³ -vollständigen Versuchsplans	66
Abbildung 5.1:	Zugscherversuch der Graphit-Compound/Metall-Verbunde	67
Abbildung 5.2:	Schematische und reale Darstellung der In-plane- Widerstandsmessung.....	68
Abbildung 5.3:	Ablauf der elektrischen Widerstandsmessung in der Fügezone	69
Abbildung 5.4:	Verwendete LFA-457-Anlage für die thermische Analyse	70
Abbildung 6.1:	Systematische Vorgehensweise bei den Voruntersuchungen	72
Abbildung 6.2:	Ultraschallschweißen einer PP-Platte PPG86-Graphit- Compound mit Schliffbild der Fügezone (A-A) mit Sonotrode A	73
Abbildung 6.3:	Schliffbild der Fügezone (A-A) nach dem Ultraschallschweißen einer PP-Platte mit PPG86-Graphit Compound mittels Sonotrode A	73
Abbildung 6.4:	Rissbildung an einer PPG86-Platte	74
Abbildung 6.5:	Schliffbild der Fügezone (A-A) von PP-Platte mit PPG86-Graphit- Compound, Sonotrode A	75
Abbildung 6.6:	CAD Modell der verwendeten Sonotroden.....	76
Abbildung 6.7:	Ultraschallschweißen einer PPG86-Platte mit Ni-Netz ohne Vorwärmung	76
Abbildung 6.8:	Schliffbild und REM-Aufnahme der Fügezone einer Ultraschallschweißung einer PPG86-Platte mit einem Ni-Netz unter Vorwärmung mit Sonotrode	77
Abbildung 6.9:	REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer BMA5-Platte mit einem Ni-Netz mit einer Sonotroden- fügefläche von 30 x 30 mm bei einer T _v = 110 °C	78
Abbildung 6.10:	REM-Aufnahme der Oberfläche einer US-Schweißen BMA5- Platte mit Ni-Netz	79
Abbildung 6.11:	REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer BMA5-Platte mit einem Ni- Netz mit einer Sonotroden- Fügefläche von 30 x 30 mm bei einer T _v =130°C.....	79
Abbildung 6.12:	Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung des Verbundes aus BMA5- Platte mit vergoldetem Ni-Netz	80

Abbildung 6.13: Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessung des Verbundes aus BMA5-Platte mit unbeschichtetem Ni-Netz	80
Abbildung 6.14: Schliffbilder der Fügezone beim Ultraschallschweißen von BMA5-GDL	83
Abbildung 6.15: REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer BMA5-Platte mit GDL unter Vorwärmung mit der Sonotrode B	83
Abbildung 6.16: REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer TECACOMP®-PP-HTE- Platte mit einem Edelstahlnetz unter Vorwärmung mit der Sonotrode A (Sonotrodenseite).....	84
Abbildung 6.17: REM-Aufnahme der Oberfläche einer Ultraschallschweißung einer TECACOMP®-PP-HTE- Platte mit einem Edelstahlnetz unter Vorwärmung mit der Sonotrode A (Ambossseite)	84
Abbildung 7.1: Risse an einer PPG86-Platte bedingt durch die Abweichung der Fügezone von der Mitte	88
Abbildung 7.2: Risse einer PPG86-Platte bedingt durch eine zu hoch eingestellte Vorwärmungstemperatur	89
Abbildung 7.3: Versuchsaufbau zur Messung der Probestemperatur	90
Abbildung 7.4: Gemessene Probestemperatur (PPG86) bei Änderung der Amboss-Temperatur	91
Abbildung 7.5: Gemessene Probestemperatur (BMA5) bei Änderung der Amboss-Temperatur	91
Abbildung 7.6: Vergleich der Soll-Ist-Schweißenergie bei PPG86.....	96
Abbildung 7.7: Vergleich der Soll-Ist-Schweißenergie bei BMA5	96
Abbildung 7.8: Schematische Darstellung des Temperaturmessaufbaus in der Fügezone	97
Abbildung 7.9: Temperaturverlauf in der Fügezone während des Vorwärmungs- und Schweißprozesses bei den Proben PPG-1 und PPG-5	98
Abbildung 7.10: Temperaturverlauf in der Fügezone während des Vorwärmungs- und Schweißprozesses bei den Proben BMA-1 und BMA-5.....	98
Abbildung 7.11: Messpunkt des Fügeweges in der Fügezone.....	99
Abbildung 7.12: 3D Multifokus-Rekonstruktion der Fügezone bei BMA-1	99
Abbildung 7.13: Korrelation Fügeweg/Schweißzeit sowie Fügeweg/ Vorwärmungstemperatur bei PPG8	100
Abbildung 7.14: Korrelation Fügeweg/Schweißzeit sowie Fügeweg/ Vorwärmungstemperatur bei BMA5	100
Abbildung 7.15: Regressionsmodell für lineare Abhängigkeit nach	101
Abbildung 7.16: Querschliffbilder durch die Fügezone bei den Proben PPG86-1 und BMA5-7 mit $T_v = 60^\circ\text{C}$	102
Abbildung 7.17: Querschliffbilder durch die Fügezone bei den Proben PPG86-7/8 und BMA5-7/8	103

Abbildung 7.18: Querschliffbilder durch die gesamte Fügezone bei den Proben PPG86-7/8 und BMA-1/7/8	104
Abbildung 7.19: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße Scherzugfestigkeit bei PPG86.....	105
Abbildung 7.20: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße Scherzugfestigkeit bei BMA5	106
Abbildung 7.21: REM-Aufnahme der Fügezone vor und nach dem Scherzugversuch	107
Abbildung 7.22: Gegenüberstellung der Erwartungs-und ermittelten Werte der Scherzugfestigkeit.....	108
Abbildung 7.23: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Scherzugfestigkeit abhängig von der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur	108
Abbildung 7.24: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Scherzugfestigkeit abhängig von der Schweißzeit und der Schweißenergie.....	109
Abbildung 7.25: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße Scherzugdehnung bei PPG8.....	110
Abbildung 7.26: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße Scherzugdehnung bei PPG86.....	111
Abbildung 7.27: Gegenüberstellung der Erwartungs-und der ermittelten Werte der Scherzugfestigkeit.....	111
Abbildung 7.28: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Dehnung abhängig von der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur.....	112
Abbildung 7.29: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Dehnung abhängig von der Schweißzeit und der Schweißenergie bei PPG86	113
Abbildung 7.30: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Dehnung abhängig von der Schweißzeit und der Schweißenergie bei BMA5	113
Abbildung 7.31: Gemessene Werte des elektrischen Widerstandes zwischen Kupferbolzen und Kupferplatte	114
Abbildung 7.32: Gemessene Werte des elektrischen Widerstandes an zwölf PPG86/BMA5-Platten.....	115
Abbildung 7.33: Werte des elektrischen Widerstandes an zwölf PPG86/BMA5-Platten mit aufgelegtem Metallnetz	116
Abbildung 7.34: Werte des elektrischen Widerstandes an 12 PPG86/BMA5-Platten geschweißt mit Metallnetz	117
Abbildung 7.35: Reduzierung des elektrischen Widerstandes im Vergleich beim Ultraschallschweißen von Netzen mit Graphit-Compound im Vergleich.....	118
Abbildung 7.36: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße elektrischer Widerstand bei PPG8	119
Abbildung 7.37: Beurteilung aller Einflussfaktoren auf die Zielgröße elektrischer Widerstand bei BMA5	120

Abbildung 7.38: Gegenüberstellung der Erwartungs- und ermittelten Werte des elektrischen Widerstandes	120
Abbildung 7.39: Gegenüberstellung der Ergebnisse der elektrischen Widerstände abhängig von der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur	121
Abbildung 7.40: Gegenüberstellung der Ergebnisse der elektrischen Widerstände abhängig von der Schweißzeit und der Vorwärmungstemperatur bei BMA5.....	122
Abbildung 7.41: Ergebnisse der Optimierung der Zielgrößen bei PPG86 bei optimaler Vorwärmungstemperatur	124
Abbildung 7.42: Ergebnisse der Optimierung der Zielgrößen bei PPG86 bei optimaler Schweißenergie.....	124
Abbildung 7.43: Ergebnisse der Optimierung der Zielgrößen bei BMA5 bei optimaler Vorwärmungstemperatur	125
Abbildung 7.44: Ergebnisse der Optimierung der Zielgrößen bei BMA5 bei optimaler Schweißenergie.....	125
Abbildung 7.45: Ergebnisse der Temperaturleitfähigkeit ausgewählter Proben aus PPG86	126
Abbildung 7.46: Ergebnisse der Temperaturleitfähigkeit ausgewählter Proben aus BMA5	127
Abbildung 7.47: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität bei den Grundwerkstoffen	128
Abbildung 7.48: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität beim hergestellten Verbund.....	128
Abbildung 7.49: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit für BMA5 / Metall-Verbund.....	129
Abbildung 7.50: Ermittelte Wärmeleitfähigkeit für PPG86 / Metall-Verbund.....	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Ultraschall-Schweißarbeit Kompatibilitätstabelle für Thermoplaste.....	34
Tabelle 3.2:	Ultraschallschweißbarkeit-Kompatibilitätstabelle für Metalle	35
Tabelle 4.1:	Verwendete hochgefüllte Graphit-Compounds	47
Tabelle 4.2:	Physikalische Eigenschaften der verwendeten hochgefüllten Graphit-Compounds	48
Tabelle 4.3:	Rauheitsmessung der hochgefüllten Graphit-Compounds.....	52
Tabelle 4.4:	Mechanische und physikalische Eigenschaften der verwendeten metallischen Werkstoffe	55
Tabelle 4.5:	Physikalische und chemische Eigenschaften des Sonotrodenmaterials nach	59
Tabelle 4.6:	Auslegung der Sonotroden nach [DVS 2216-1]	60
Tabelle 5.1:	Ermittelte Gewichtskraft der Federspannvorrichtung	69
Tabelle 5.2:	Abhängigkeit zwischen Federweg und Gesamtdruck bei der Federdruckvorrichtung.....	69
Tabelle 6.1:	Verwendete Schweißparameter.....	77
Tabelle 6.2:	Verwendete Schweißparameter	82
Tabelle 7.1:	Maximal mögliche Einflussfaktoren.....	88
Tabelle 7.2:	Gemessene Zielgrößen	93
Tabelle 7.3:	Verwendete Faktorstufen für PPG86	94
Tabelle 7.4:	Verwendete Faktorstufen für BMA5	94
Tabelle 7.5:	Faktorplan für PPG86 mit drei Faktoren und vier Zentrumsunkten	95
Tabelle 7.6:	Faktorplan für BMA5 mit drei Faktoren und vier Zentrumsunkten	95
Tabelle 7.7:	Regressionsmodell für die Scherzugfestigkeit.....	105
Tabelle 7.8:	Regressionsmodell für die Scherzugdehnung in der Fügezone	110
Tabelle 7.9:	Regressionsmodell für die elektrische Widerstand in der Fügezone	119
Tabelle 8.1:	Optimierte Einflussfaktoren und Zielgröße bei PPG86 und BMA5	130